



Erstellung des Feinkonzeptes der Datentechnik für einen meteorologischen Messmasten mit hoher Verfügbarkeit und Analyse der Fehlertoleranzen der dazugehörigen Systeme

MASTERARBEIT

des Studienganges Luft- und Raumfahrttechnik
an der Technischen Universität Braunschweig

von

Maximilian Schubert

10.08.2020

Matrikelnummer	4917096
Unternehmen	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Braunschweig
Betreuer des Unternehmens	Dr. Stephan Graeber Institut für Flugsystemtechnik des DLR Abteilung Flugversuchstechnik und IT Lilienthalplatz 7 38108 Braunschweig Stephan.Graeber@dlr.de
Betreuer der TU Braunschweig	Prof. Dr.-Ing Stefan Levedag Institut für Flugführung der TU Braunschweig

Erklärung

Ich versichere an Eides Statt, dass ich die vorliegende Abschlussarbeit selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Die wörtliche oder sinngemäße Übernahme von Abschnitten aus Texten Dritter sowie aus eigenen vorangegangenen Veröffentlichungen habe ich kenntlich gemacht.

Braunschweig, den 10.08.2020

Maximilian Schubert

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird für das Projekt DFWind ein Feinkonzept der Datentechnik für einen meteorologischen Messmasten mit dem Ziel einer hohen Verfügbarkeit vorgestellt. Dabei wird das Projekt kurz illustriert und eine Zusammensetzung sowie Eingrenzung der notwendigen Datentechnik für einen Betrieb von mehreren Sensoren auf dem Messmasten erarbeitet.

Um das Thema der Fehlertoleranz zu vermitteln und das Verständnis gegenüber der Auswahl des Feinkonzeptes entgegenzubringen, wird zunächst eine Einführung in dieses Fachgebiet gegeben. Hierbei wird die Terminologie sowie die verschiedenen Arten der Analysemethoden wie eine FMEA und Fehlerbaumanalyse erläutert. Mittels dieser Methoden und sehr vielseitigen Literaturquellen wird jedes einzelne Gerät auf seine Fehlerarten, deren Quellen sowie Vermeidung untersucht. Diese Aspekte werden für eine weitere Eingrenzung der Geräteauswahl und für eine Überprüfung der Integrität des aktuell vorliegenden Konzeptes verwendet.

Da die Bewertung der einzelnen Geräte keine Fehler aufgrund der Kombination aller Geräte in einem Verbund identifiziert, wird zusätzlich eine Betrachtung unter weiteren Blickwinkeln durchgeführt. Hierzu zählen menschliche und technische Fehler sowie Ursachen, welche auf die Umwelt zurückzuführen sind.

Abstract

In this thesis, the detailed data technology concept for a meteorological met mast for the project DFWind will be presented with the main goal of achieving high availability. The project will be briefly illustrated followed by the elaboration of the composition as well as the perimeter of the necessary data technology for operating several sensors on the met mast

In order to introduce the basic principles of fault tolerance and to promote comprehension for the selection of the detailed concept, a general description of this topic will initially be given. Therefore, the terminology as well as various types of analyzing methods such as FMEA and fault tree analysis will be outlined. Using these methods and versatile literature, each individual device will be analyzed for its types of errors, their sources and measures to avoid them. These aspects will be used for further narrowing down the device selection and to verify the integrity of the currently existing concept.

Since the evaluation of the individual devices does not identify faults due to the combination of all devices as a whole system, additional perspectives will be conducted. Among them are human and technical faults as well as causes referring to the environment.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Dr. Stephan Graeber und Prof. Dr.-Ing Stefan Levedag, die meine Masterarbeit betreut und begutachtet haben. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken. Vor allem wertschätze ich Henrik Oertel, dass er mir die Arbeit an diesem Projekt sowie das Anfertigen meiner vorherigen Studienarbeit ermöglicht hat.

Weiterhin gilt mein Dank Dr.-Ing. Carsten Monka-Ewe, der mich mittels EMV-Messungen in unserem Labor aus dem Home Office der Corona-Krise zwischenzeitlich aus dem Alltag gezwungen hat. (Für die Jungs, die gleich genannt werden: Ich liebe Frequenzen :))

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Arbeitskollegen und Freunden Alexander Bismark und Patrik Juchmann bedanken, die mir im Rahmen gemeinsamer Freizeitaktivitäten zu neuer Inspiration und Kreativität für die Erstellung dieser Arbeit verhalfen.

Ein besonderer Dank gilt Sören Cleve für das Korrekturlesen, ohne dieses die Arbeit nicht hätte in dieser Form vorliegen können.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern, Barbara und Peter Schubert, sowie meinem Bruder, Daniel Schubert, bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und stets ein offenes Ohr für meine Sorgen hatten. Ab jetzt können wir im Allgäu-Urlaub noch mehr wandern gehen ;) .

Maximilian Schubert,

Braunschweig, den 10.08.2020

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VIII
Symbolverzeichnis	X
Glossar englischer Begriffe.....	X
1 Einleitung	1
2 Aufbau des Meteorologiemastes	3
2.1 DFWind.....	3
2.2 Zusammensetzung der Messtechnik	6
2.2.1 IECplus-Mast.....	6
2.2.2 Hauptschaltschrank.....	8
2.2.3 Geräteschrank IEC, Stromversorgung und Netzwerktechnik des Hauptschaltschranks	9
3 Einführung in den Begriff der Fehlertoleranz	16
3.1 Terminologie	16
3.1.1 Redundanz.....	16
3.1.2 Zuverlässigkeit	17
3.1.3 Verfügbarkeit	18
3.1.4 Mean Time Between Failures.....	19
3.2 Analysemethoden	22
3.2.1 Fehlerbaumanalyse	26
3.2.2 Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)	28
3.2.3 Vergleich einer FMEA zu einer Fehlerbaumanalyse	31
4 Beschreibung der Messtechnik	34
4.1 Anschluss der Sensoren und Konfiguration der Messanlage.....	34
4.2 Programmierung eines Fremdgeräteinterface	36
4.3 Inbetriebnahme und Durchführung eines Systemtests	37
5 Beurteilung der Fehlertoleranz	43
5.1 Analyse der einzelnen Komponenten	43
5.1.1 Firewall.....	43
5.1.2 Mobilfunkmodul	47
5.1.3 Netzwerk-Switches.....	49
5.1.4 NTP-Server	51
5.1.5 Kühlgeräte und Heizungen.....	53
5.1.6 Sensoren	57

5.1.6.1	Schalensternanemometer	57
5.1.6.2	Thermo-Hygrogeber	58
5.1.6.3	Barometer	59
5.1.6.4	Niederschlagssensor	60
5.1.6.5	Ultraschallanemometer	61
5.1.6.6	Sensoren im Allgemeinen	64
5.1.7	Steuer-PC.....	65
5.1.7.1	Speichermedien.....	66
5.1.7.2	Allgemeiner Fehlerquellen in Computersystemen	71
5.1.7.3	Betriebssystem	75
5.1.8	Messsystem	77
5.1.9	Überspannungsschutz.....	78
5.1.10	Stromversorgungen, USV und Relais.....	80
5.1.11	Steckertypen und Schnittstellen	89
5.1.11.1	RJ45-Stecker.....	90
5.1.11.2	Schuko-Steckdose.....	92
5.1.11.3	RS485- und RS422-Schnittstelle	93
5.1.11.4	Glasfaser und SFP-Transceiver	94
5.1.11.5	Konnektoren im Allgemeinen.....	95
5.1.11.6	Strom- und Datenleitungen.....	96
5.1.12	Schaltschrank.....	97
5.2	Betrachtung der Fehler unter dem Blickwinkel typischer Fehlerquellen	99
5.2.1	Menschliche Fehler	99
5.2.2	Technische Fehler	104
5.2.3	Umwelt	105
5.2.3.1	Zusammensetzung der Luft.....	105
5.2.3.2	Niederschlag und Überschwemmung.....	106
5.2.3.3	Eisbildung des Messmasts und der WEAs	108
5.2.3.4	Blitzeinschlag.....	111
5.2.3.5	Sonstige Umweltbedingungen	114
5.3.4	Quantifizierung der einzelnen Fehlerursachen	118
6	Zusammenfassung und Ausblick	122
A	Verzeichnisse	123
A.1	Literaturverzeichnis.....	123
A.2	Abbildungsverzeichnis	132
A.3	Tabellenverzeichnis	134
A.4	FMEA des IECplus-Messmastes für DFWind	135
A.5	FTA des IECplus-Messmastes für DFWind	177

Abkürzungsverzeichnis

AGM	Absorbent Glass Mat
ALARP	As Low As Reasonably Practicable
ARP	Aerospace Recommended Practice
ARR	Annual Replacement Rate
CPU	Central Processing Unit
DDoS	Distributed Denial-of-Service
DFWind.....	Deutsche Forschungsplattform für Windenergie
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMC	Daten Management Center
DoS	Denial-of-Service
DWPD.....	Drive Writes per Day
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
FC.....	Fibre Channel
FH.....	Flugstunde (eng.: Flight Hour)
ForWind	Zentrum für Windenergieforschung der Universitäten Oldenburg, Hannover und Bremen
FMEA.....	Failure Mode and Effects Analysis
FMECA	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis
FTA.....	Fault Tree Analysis
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HAST	Highly Accelerated Stress Test
ICMP.....	Internet Control Message Protocol
IEC	International Electrotechnical Commission
I/O-Link.....	Input/Output-Link
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IP20	International Protection 20
IWES	Institut für Windenergiesysteme
GNSS	Global Navigation Satellite System

GUI Graphical User Interface
 HDD..... Hard Disk Drive
 HPC High Performance Computing
 LTE Long Term Evolution
 MAC..... Media Access Control
 MEASNET Measuring Network of Wind Energy Institutes
 MLC Multi Level Cell
 MTBF..... Mean Time Between Failures
 MTTF Mean Time To Failure
 MTTR..... Mean Time To Repair
 NEMA National Electrical Manufacturers Association
 NTP Network Time Protocol
 NUMA..... Non-Uniform Memory Access
 OS Operating System
 PCB Printed Circuit Board
 ProWind..... Platform for Research on Wind Energy
 PTC Positive Temperature Coefficient
 PWE Plattform für Windenergie
 QLC Quadruple Level Cell
 RAID..... Redundant Array of Independent Disks
 RAM..... Random Access Memory
 RBER..... Raw Bit Error Rate
 RJ Registered Jack
 RPN..... Risikoprioritätszahl (eng.: Risk Priority Number)
 RS Recommended Standard
 SATA Serial Advanced Technology Attachment
 SCSI Small Computer System Interface
 SFP..... Small Form-factor Pluggable
 SIEM..... Security Information and Event Management
 SIM Subscriber Identity Module
 SLC Single Level Cell
 SMP Symmetrisches Multiprozessorsystem
 SMS..... Short Message Service

SPD	Überspannungsschutz (eng.: Surge Protection Device)
SSD	Solid State Drive
SSH	Secure Shell
SYN	Synchronize
TBW.....	Total Bytes Written
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TCXO.....	Temperature Compensated Crystal Oscillator
TLC.....	Triple Level Cell
TLS.....	Transport Layer Security
USA	Ultraschallanemometer
USB	Universal Serial Bus
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
UTC	Coordinated Universal Time
VLAN	Virtual Local Area Network
VPN	Virtual Private Network
VRLA	Valve Regulated Lead-Acid
WEA	Windenergieanlage

Symbolverzeichnis

λ [–]	Ausfallrate
f [–]	Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte
F [–]	Verteilungsfunktion der Lebensdauer
R [–]	Zuverlässigkeit
t [h]	Zeit
TV [h]	Verfügbarkeitszeit

Glossar englischer Begriffe

AND-Operator	UND-Operator
Annual Replacement Rate	Jährliche Austauschrate
As Low As Reasonably Practicable	So gering wie vernünftigerweise möglich
Availability	Verfügbarkeit

Bad Block Management.....	Management fehlerbehafteter Zellen (SSD)
Bit Error Rate	Bitfehlerrate
Bottom-Up	Von unten nach oben
Buffer	Speicherpuffer
Bug	Fehler in einer Software
Cold Switching.....	Relaisschaltung ohne ohmscher Last
Continuous Availability.....	Kontinuierliche Verfügbarkeit, Nonstop
Denial of Service	Dienstverweigerung (Firewall)
Derating	Keine Ausnutzung der vollen Leistungsfähigkeit
Detection	Entdeckungswahrscheinlichkeit (FMEA)
Drive Writes per Day.....	Laufwerksschreibvorgänge pro Tag
Effect on Batches or Vintage	Effekt von Chargen oder des Jahrgangs
Fail Graceful	Sanfte Rückstellung (eines Systems)
Fail Safe	Fehlersicherheit
Failure Analysis	Fehleranalyse
Failure Mode and Effects Analysis	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
Failure Rate	Ausfallrate
Fault Propagation	Fehlerfortpflanzung
Fault Tolerance.....	Fehlertoleranz
Fault Tree Analysis.....	Fehlerbaumanalyse
Flight Hour	Flugstunde
Forward Error Correction	Vorwärtsfehlerkorrektur
Garbage Collection.....	Löschung nicht mehr benötigter Zellen (SSD)
Graphical User Interface.....	Grafische Benutzeroberfläche
High Performance Computing	Hochleistungs Datenverarbeitung
Hot Switching.....	Relaisschaltung mit ohmscher Last
Internet of Things.....	Internet der Dinge
Leak.....	Undichte Stelle (Firewall)
Mean Time Between Failures	Mittlere Betriebszeit zwischen zwei Ausfällen
Mean Time To Fail.....	Mittlere Betriebszeit bis zum Ausfall
Mean Time To Repair	Mittlere Zeit für eine Reparatur
Non-Uniform Memory Access.....	Ungleichmäßiger Speicherzugriff (SSD)
Occurence	Auftrittswahrscheinlichkeit

OR-Operator	ODER-Operator
Power Derating	Herabstufen von aufzunehmenden Leistungen
Redundancy	Redundanz
Redundant Array of Independent Disks	Redundantes Array unabhängiger Festplatten
Reliability	Zuverlässigkeit
Remote Procedure Call	Aufruf einer fernen Prozedur
Resume-Mode	Wiederaufnahme-Modus (Messsystem)
Risk Priority Number	Risikoprioritätszahl (FMEA)
Severity	Bedeutung (FMEA)
Single Point of Global Failure	Einzelner Ausfallpunkt
Sleep-Mode	Ruhezustand (Messsystem)
Surge Protection Device	Überspannungsschutz
Top-Down	Von oben nach unten
Total Bytes Written	Gesamtanzahl geschriebener Bytes
Virtual Local Area Network	Virtuelles lokales Zonennetzwerk
Watchdog	Funktion zur Ausfallerkennung
Wear-Leveling-Technique	Nutzungsverteilungs-Technik (SSD)

1 Einleitung

Die Erschließung von CO₂-neutralen Energiequellen gewinnt in Deutschland immer mehr an Bedeutung und bewegt somit den Energiesektor dazu, in Richtung dieser Quellen zu forschen. Hierzu gehört auch die Energiegewinnung mittels Windkraft, welche im Jahr 2018 mit 49,6 % den größten Anteil an der Strombereitstellung aus erneuerbaren Energien ausmachte [1]. Daher begründete das *Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR) in enger Kooperation im Rahmen des Forschungsverbundes Windenergie mit ForWind – Zentrum für Windenergieforschung der Universitäten Oldenburg, Hannover und Bremen – sowie dem Fraunhofer IWES Nordwest das Projekt *Plattform für Windenergie* (PWE). Dieses besteht aus zwei Projekten. In der *Plattform for Research on Wind Energy* (ProWind) wird die Basisinfrastruktur bestehend aus zwei Multimegawatt-Windenergieanlagen aufgebaut und ein Standort beschlossen. Über die *Deutsche Forschungsplattform für Windenergie* (DFWind) werden ein Meteorologiemast, ein Array aus drei Messmasten und verschiedenste Sensoren aufgebaut und betrieben. Dabei ist das Ziel, eine Forschungsplattform für Windenergie zu schaffen und dadurch unter anderem in den Gebieten der Meteorologie, Geotechnik und Akustik einzigartige Kenntnisse zu erlangen sowie neue Entwicklungen hinsichtlich der Effizienz und Umweltentlastung voranzutreiben.

Der Meteorologiemast wird hierfür mit einer Vielzahl an Sensoren (Anemometer, Windrichtungsgeber, Hygrometer etc.) ausgestattet, deren Signale über eine Messanlage am Fuß des Mastes zusammengetragen werden sollen. Die Messanlage muss dazu einer Konfiguration unterzogen werden, sodass alle Signale korrekt und zeitlich übereinstimmend für eine Auswertung bereitstehen. Jedoch muss das System zuvor ausreichend getestet werden. Eingebettet wird das Messsystem in einen Schaltschrank, welcher zum einen eine direkte Zugriffsmöglichkeit über einen Steuerungscomputer und zum anderen einen ortsunabhängigen Zugriff über ein Netzwerk erlaubt. In dieser Arbeit wird das vorhandene Grundkonzept der im Schaltschrank befindlichen Systeme als Vorlage verwendet und so verfeinert, dass alle Systeme korrekt miteinander interagieren, Signale korrekt interpretiert, die Messdaten sicher erfasst werden und die Anlage online überwacht werden können.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Fehlertoleranz des Gesamtsystems des Schaltschranks, da zur Messdatenerfassung und –speicherung eine möglichst hohe

Zuverlässigkeit gewährleistet werden sollte. Dafür wird der Begriff der Fehlertoleranz zunächst genauer erläutert und eine Auswahl an Analysemethoden wie z.B. der Fehlerbaumanalyse gezeigt. Anschließend werden die Fehlerquellen einzelner Systeme beschrieben und unter einem anderen Blickwinkel in menschliche, technische und Umweltfaktoren eingeteilt. Beide Anschauungsweisen werden wiederum in eine *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) eingebettet und damit eine wirtschaftliche Gesamtbetrachtung durchgeführt sowie auf mögliche Redundanzen geachtet.

2 Aufbau des Meteorologiemastes

Zu Beginn dieses Kapitels wird das Projekt DFWind mit seinen Anforderungen und Zielsetzungen genauer erläutert. Folgend wird die Messtechnik samt der Sensoren und Messanlage des meteorologischen Messmastes aufgelistet und beschrieben. Dabei werden die Betriebstechnik und Datenerfassung in einem Schaltschrank integriert. Dieser wurde unter mehreren Forschungsträgern aufgeteilt, wobei der Geräteschrank IEC für das Institut für Flugsystemtechnik des DLR vorgesehen ist.

Für die weitere Nutzung in dieser Arbeit sind die Begriffe Messtechnik, Messanlage und Messsystem folgendermaßen definiert:

- Messsystem: Gerät des Unternehmens imc, welches analoge und digitale Sensorsignale aufnimmt.
- Messanlage: Messsystem wie oben beschrieben zuzüglich eines Steuer-PCs.
- Messtechnik: Messanlage wie oben beschrieben zuzüglich Sensorik und Infrastruktur.

2.1 DFWind

Die *Deutsche Forschungsplattform für Windenergie* (DFWind) wurde durch das DLR, ForWind sowie dem Fraunhofer IWES begründet und hat sich den Aufbau einer Windenergieforschungs- und Entwicklungsplattform zum Ziel gesetzt. Mit Hilfe dieser sollen zahlreiche Themen für die Nutzung von *Windenergieanlagen* (WEA) nicht nur an Land, sondern auch auf der See umfangreich und in einer bisher unerreichten Qualität bearbeitet werden können. Im Vordergrund steht die ganzheitliche Betrachtung, in welcher der Forschungsfokus auf der Interaktion der Subsysteme im Gesamtsystem Windenergieanlage liegen wird. Dabei wird die gegenseitige Beeinflussung zweier separater Windenergieanlagen bis hin zur Wirkung auf das Verbundnetz berücksichtigt werden.

Zusätzlich zu einer rein physikalisch-technischen Betrachtung wird die Fragestellung um sozio-ökonomische und ökologische Gesichtspunkte rund um das Thema Windenergie erweitert. [2]

Des Weiteren sieht das Projekt übergeordnete Projektziele in den vier folgenden Kategorien vor [2]:

1. Wirtschaft und Industrie

Unternehmen soll es ermöglicht werden, neueste vorwettbewerbliche Konzepte erproben und demonstrieren zu können, da eine Erprobung an kommerziell genutzten Windenergieanlagen seitens des Unternehmens mit hohen wirtschaftlichen Risiken verbunden ist.

2. Beantwortung wissenschaftlicher Fragestellungen

Da noch Unkenntnisse um wissenschaftliche Fragestellungen bestehen, wird eine umfangreiche Instrumentierung der Forschungsplattform bestehend aus zwei Windenergieanlagen und Equipment zur Vermessung von Windfeldern, Schall und Umgebungsbedingungen vorgesehen.

3. Nutzung von Synergieeffekten bei interdisziplinärer Forschung

Die Anzahl an unterschiedlichen Projektpartnern, welche ihre fachlichen Themenbereiche erforschen, fördert einen interdisziplinären Austausch. Auch wird eine Neu- und Weiterentwicklung von Methoden und Modellen sowie deren Validierung durch eine umfangreiche Mess- und Modelldatenbasis geschaffen.

4. Vernetzung und Transfer

Es wird ein innovatives Kooperationsformat geschaffen, indem eine Zusammenarbeit zwischen einer Großforschungseinrichtung (DLR), eines universitären Verbundes (ForWind) und eines anwendungs- und dienstleistungsorientierten Forschungsinstituts (IWES) durchgeführt wird. Dieses ermöglicht eine intensive Vernetzung von Lehre, Grundlagen- und Anwendungsforschung, Dienstleistung sowie Innovationsmanagement auf nationaler und internationaler Ebene. Weiterhin werden weitere Kooperationen mit Partnern aus der Wissenschaft und Wirtschaft realisiert und angestrebt.

Aufgebaut wird in diesem Projekt verschiedenste Sensorik, die auf insgesamt vier Masten mit einer Höhe von bis zu 150 m, auf zwei WEAs und in Bodennähe platziert

werden (siehe Abb. 2.1). Zum einen handelt es sich um ein experimentelles Array bestehend aus drei Masten, welches für die Vermessung des Windfeldes in der gesamten Rotorebene verwendet und seitlich vor eine WEA platziert wird. Zum anderen wird ein einzelner Meteorologiemast für eine detaillierte Windmessung und der Messung der Strukturdynamik auf verschiedenen Höhen seitlich vor eine zweite WEA platziert. Dieser wird eine Konformität gegenüber der Norm *International Electrotechnical Commission* (IEC)-61400-12-1 für eine Vermessung und Zertifizierung von WEAs zur Aufnahme von Wind- und Umgebungsmesstechnik besitzen. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der Meteorologiemast daher als IECplus-Mast bezeichnet werden. Die Hauptwindkomponente wird dabei zuerst den IECplus-Masten antreffen, weiter über die zweite WEA ziehen und im Folgenden das Mastenarray sowie die erste WEA erreichen. Weiterhin wird die Datenerfassung und Betriebstechnik der Sensoren sowie Messanlagen in einem Schaltschrank untergebracht, welcher direkt am Fuß des IECplus-Mastes integriert und Schutz vor Witterung und unbefugten Drittpersonen bieten wird. Außerdem wird in einer zweiten Projektphase ein *Daten Management Center* (DMC) in einem Gebäude aufgebaut werden.



Abb. 2.1: Konzept des Standortes mit zwei WEAs, vier Messmasten und dem DMC [3]

Der Kernaspekt dieser Arbeit liegt auf dem IECplus-Masten sowie dem am Fuß des Mastes installierten Hauptschaltschrank.

Als Standort wurde ein von einem Landwirt bewirtschaftetes Feld der Gemeinde Krummendeich im Landkreis Stade in Niedersachsen ausgewählt.

2.2 Zusammensetzung der Messtechnik

Die Messtechnik besteht aus mehreren unterschiedlichen Komponenten, welche in den folgenden Kapiteln genauer erläutert werden. Hierzu gehören die Sensortechnik, die auf dem IECplus-Mast integriert wird, die Datenerfassung sowie die Netzwerk- und Betriebstechnik in einem Hauptschaltschrank. Dieser ist in drei Abschnitte für verschiedene Forschungsträger aufgeteilt. In den folgenden drei Kapiteln wird dabei explizit auf den Teil eingegangen, der durch das Institut für Flugsystemtechnik des DLR entwickelt und ausgelegt wurde.

2.2.1 IECplus-Mast

Der IECplus-Mast wird eine Höhe von ca. 150 m aufweisen und mit mehreren Auslegern, welche jeweils in drei unterschiedlichen Richtungen hinauszeigen, auf insgesamt sieben Höhenstufen ausgestattet sein [4]. Die Sensorik umfasst dabei die folgenden Geräte:

- vier Schalensternanemometer
- drei Windfahnen
- ein Thermo-Hygrogeber
- ein Niederschlagssensor
- ein Barometer
- ein *Ultraschallanemometer* (USA)

Diese Ausstattung erfüllt nicht nur eine Konformität gegenüber der IEC-61400-12-1 sondern auch gegenüber der *Measuring Network of Wind Energy Institutes* (MEAS-NET)-Richtlinie [4]. Angebracht werden die Sensoren auf unterschiedlichen Höhen und Auslegern, welche zur Kompensation von Blitzeinschlägen in die Sensoren mit Blitzfangstangen ausgestattet werden (siehe Abb. 2.2). Alle Daten der Sensoren werden über eine analoge Schnittstelle übertragen, wobei das Barometer zusätzlich über eine RS485-Schnittstelle verfügt. Das USA besitzt darüber hinaus eine digitale Schnittstelle über einen Ethernet-Anschluss sowie eine RS422-Schnittstelle. Die Strom- und Datenleitungen werden von den Sensoren über den IECplus-Mast in

Richtung Boden geführt und am Fuß des Mastes in den Schaltschrank weitergeleitet. Des Weiteren werden zwei *Global Navigation Satellite System* (GNSS)-Antennen zum Erhalt von präzisen Zeitinformationen für das Messsystem und einem *Network Time Protocol* (NTP)-Server sowie eine Mobilfunkantenne im unteren Bereich integriert. Die Mobilfunkantenne wird in einer ersten Projektphase für einen Zugriff auf die Netzwerktechnik von außerhalb benötigt und in einer weiteren Phase als redundantes System betrieben.

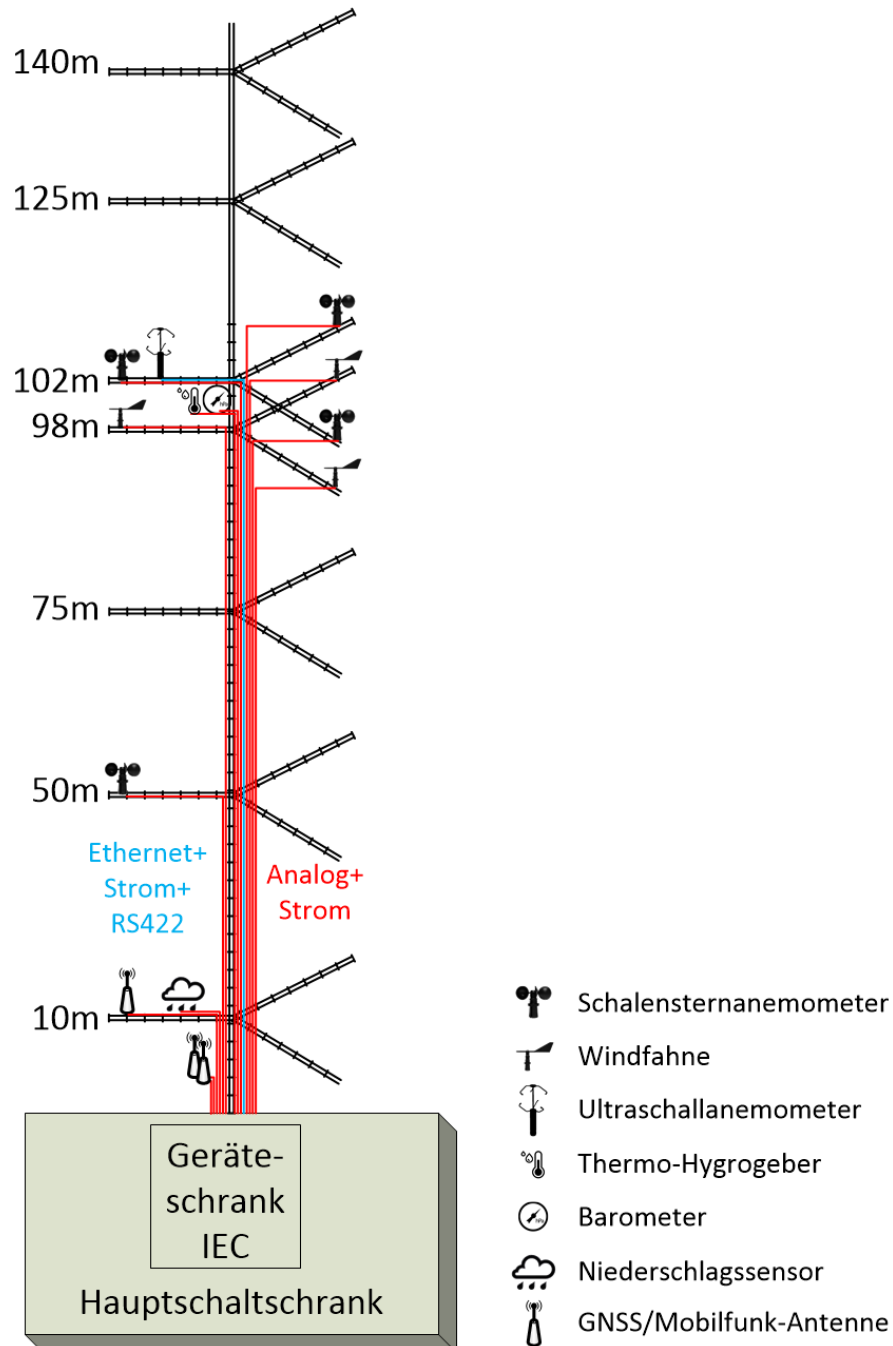
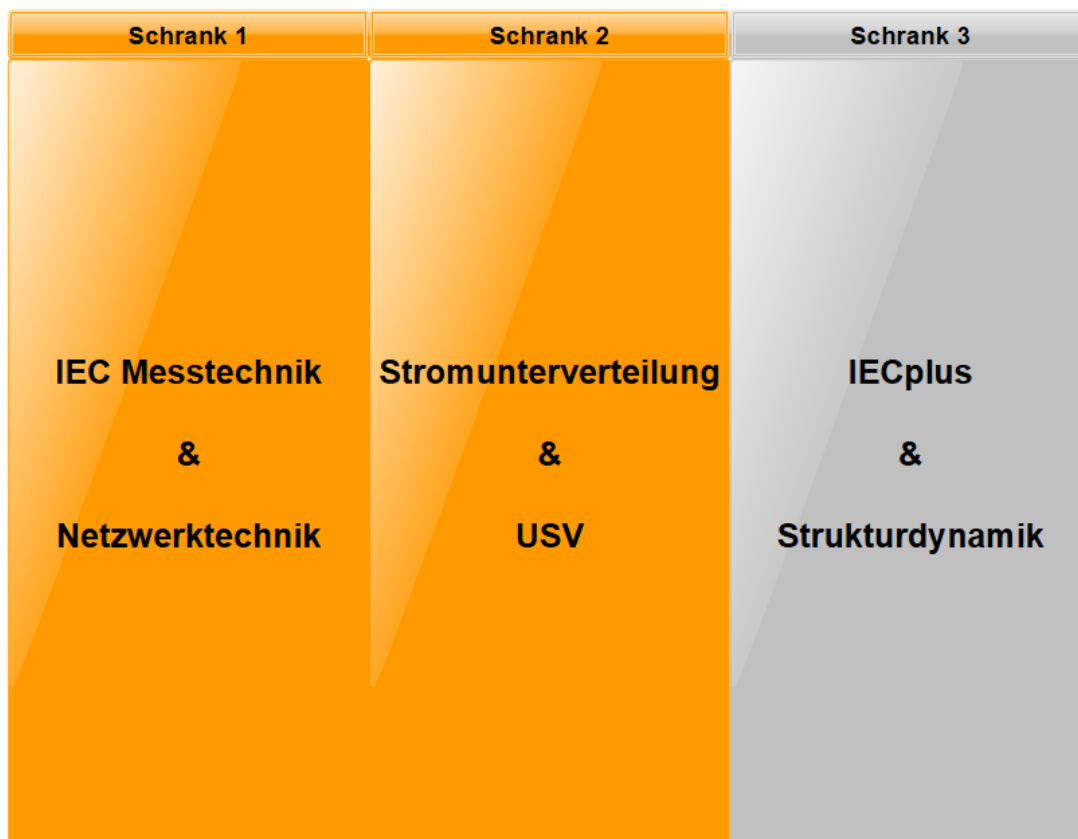


Abb. 2.2: Konzept der Sensorik auf dem IECplus-Masten des Instituts für Flugsystemtechnik des DLR [4]

2.2.2 Hauptschaltschrank

Der Hauptschaltschrank besitzt insgesamt drei Teilschränke (siehe Abb. 2.3), wobei der mittlere Schrank mit der Stromunterverteilung und einer *Unterbrechungsfreien Stromversorgung* (USV) ausgestattet wird. Im Falle eines Stromausfalles sorgt die USV für eine weitere Stromversorgung mittels Pufferakkumulatoren und ermöglicht ein Herunterfahren aller Geräte, welche für die Datenerfassung benötigt werden. Die Stromunterverteilung teilt den 3-phasigen Einspeisestrom in drei Stromkreise mit 230 V_{AC} auf, wovon zwei durch ein Netzteil auf ein Spannungsniveau von 24 V_{DC} transformiert werden. Der rechte Schrank ist zwischen sechs Forschungsträgern für die Themengebiete Strukturtechnik und IECplus aufgeteilt und wird in dieser Arbeit nicht weiter behandelt. Der linke Schrank wird durch das Institut für Flugsystemtechnik des DLR mit der Messtechnik für das Themengebiet IEC sowie der Netzwerktechnik für eine ortsunabhängige Steuerung ausgestattet.



USV: Unterbrechungsfreie Stromversorgung
IEC: International Electrotechnical Commission

Abb. 2.3: Aufteilung des Hauptschaltschranks

2.2.3 Geräteschrank IEC, Stromversorgung und Netzwerktechnik des Hauptschaltsschranks

Bei der Bestückung des linken sowie mittleren Schranks mit den jeweiligen Systemen wird eine einheitliche Spannungsversorgung von 24 V_{DC} benötigt und auf eine orts-unabhängige Steuerung über Netzwerktechnik geachtet. Abb. 2.4 zeigt die Stromversorgung aller Geräte zum einen über eine USV gepuffert für die messrelevanten Systeme und zum anderen nicht gepuffert für die Sensorheizungen, die Schaltschrankheizungen und die Klimageräte. Als einzige Ausnahme werden die Kühlgeräte vor der Spannungstransformation des Stroms mit 230 V_{AC} betrieben sowie der einzelne 230 V_{AC} Stromkreis in den rechten Schrankteil geführt. Weiterhin wird es diverse Schuko-Steckdosenplätze innerhalb und außerhalb des Schaltsschranks geben, welche mit 230 V_{AC} betrieben werden. Eine detailliertere Erläuterung der Stromversorgung und -kreise findet sich in [5].

Um von möglichst vielen Geräten Statusinformationen zu erhalten, wurde bei der Auswahl auf eine Herausgabe sowie Kommunikationsmöglichkeit miteinander geachtet. Die Vernetzung aller Kommunikationswege wird in Abb. 2.5 dargestellt. So wird über das Mobilfunkmodul mit einer Antenne ein Zugriff von außerhalb ermöglicht. Dieses ist über eine Ethernet-Schnittstelle an den Internet-Switch angebunden, welcher zum einen über vier SFP-Schnittstellen die Daten der Glasfaserleitungen des Masten-Arrays sowie des späteren Glasfaser-Internets und zum anderen über eine weitere Ethernet-Schnittstelle die Daten an einen Firewall-PC überträgt. Insgesamt verfügt der Internet-Switch über vier SFP-Ports und acht Ethernet-Ports.

Der Firewall-PC dient der Absicherung vor äußeren Angreifern und damit dem Schutz des gesamten Netzwerks des Schaltsschranks. Dabei handelt es sich um eine Hardware-Firewall, um das gesamte Netzwerk und nicht nur den Steuer-PC bzw. einzelne Komponenten über eine Software-Firewall schützen zu können. Weiterhin blockiert eine Hardware-Firewall Malware oder andere Angriffsmethoden direkt, bevor diese auf den im Netzwerk befindlichen Geräten über eine Software-Firewall aufgespürt werden würden. Für eine bessere Fehlertoleranz verfügt das Mobilfunkmodul auch über eine Firewall.

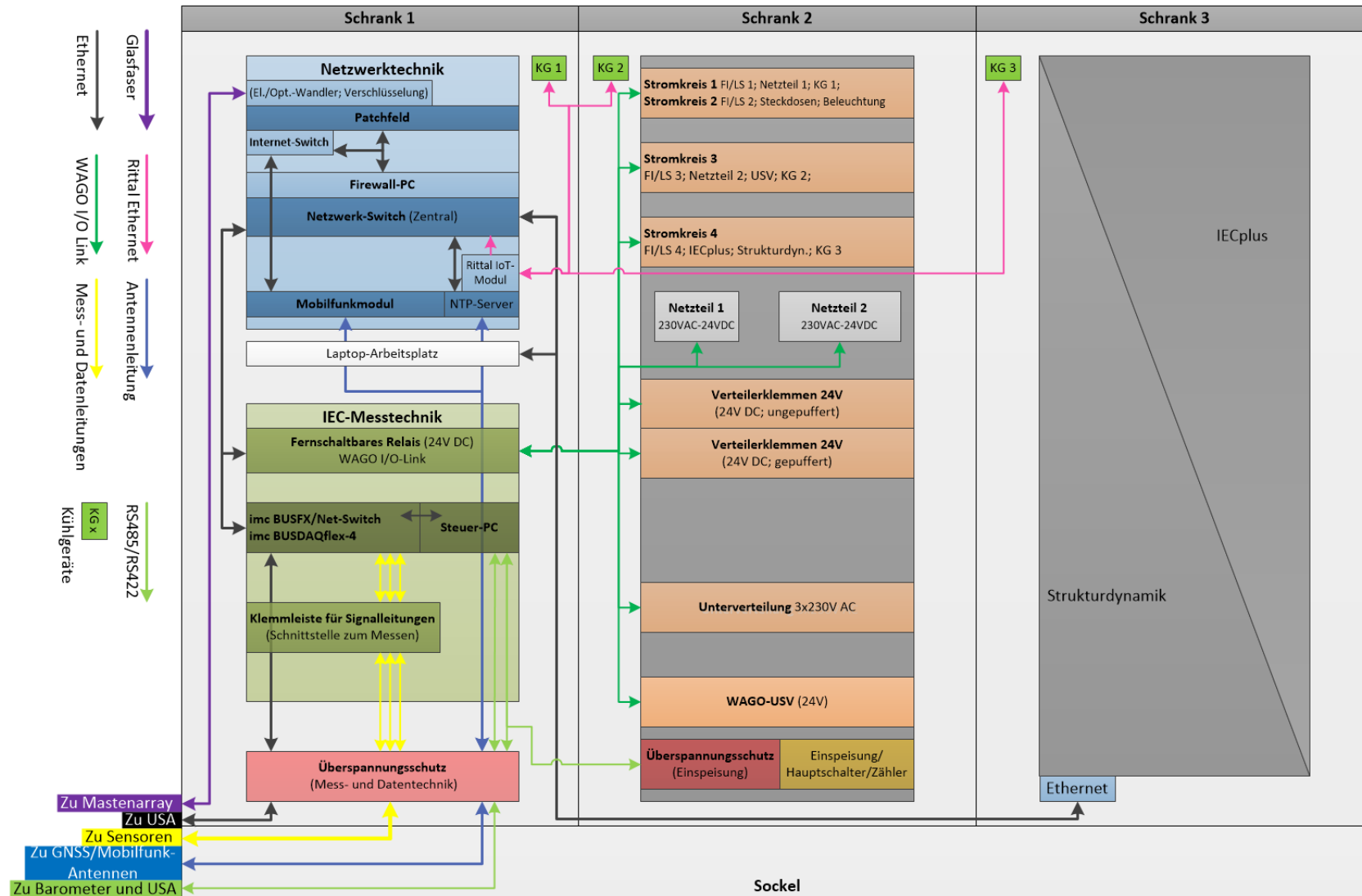


Abb. 2.5: Geräteverteilung des Hauptschaltschranks inklusive Netzwerkverbindungen [5]

Das Netzwerk wird weiterhin in drei verschiedene *Virtual Local Area Networks* (VLAN) aufgeteilt. Ein VLAN ist eine virtuelle Aufteilung des Netzwerks in weitere eigenständige Netzwerke ohne eine Abhängigkeit weiterer physischer Komponenten. So können diese Netzwerke unabhängig voneinander betrieben und erreicht werden, sodass nur für ein einzelnes Netzwerk berechtigte Personen bzw. Geräte darauf zugreifen können. Dies ist im System des Schaltschranks notwendig, da sich das Netzwerk auch auf den rechten Schaltschrank und damit eine große Anzahl an Benutzern verteilt und diese nur einen Zugriff auf ihre eigenen Messsysteme, Messdaten und PCs besitzen sollen.

Über den Zentral-Switch werden die folgenden Geräte an das Netzwerk angebunden:

- Geräteschrank IECplus & Strukturdynamik (jeweils ein Port)
- NTP-Server
- Klimageräte
- Imc BUSFX/Net-Switch

Weiterhin werden mindestens zwei Ethernet-Ports und ein SFP-Port für spätere Aufrüstungen freigehalten, sodass dieser über insgesamt acht Ethernet-Ports und vier SFP-Ports verfügt.

Der NTP-Server stellt ein System von Meinberg dar und erhält über eine GNSS-Antenne präzise Zeitinformationen, welche über das Netzwerk an die drei VLANs verteilt werden. Für das Institut Flugsystemtechnik erhalten der Steuer-PC und das USA diese Zeitinformationen.

Bei den drei Klimageräten von Rittal wird eine Master-Slave Anbindung vollzogen, sodass die zwei Slave-Kühlgeräte über einen Rittal eigenen Bus mit dem Master-Klimagerät verbunden sind. Dieses wird über eine Ethernet-Schnittstelle mit einem *Internet of Things* (IoT)-Adapter an ein IoT-Interface angeschlossen (siehe pinke Leitung in Abb. 2.5). Dieses ermöglicht über den Zentral-Switch eine Verbindung mit dem Netzwerk und erlaubt das Auslesen von Informationen sowie das Einstellen von Parametern über eine Benutzeroberfläche in einem HTML-Interface.

Mittels des imc BUSFX/Net-Switches können weitere Geräte mit dem Netzwerk kommunizieren:

- Imc BUSDAQflex Messsystem
- Ultraschallanemometer
- Steuer-PC
- WAGO PFC100-Controller

Das Messsystem stellt ein BUSDAQflex Gerät des Unternehmens imc dar und wird in Kapitel 4.1 näher erläutert sowie dessen spätere Anbindung an die Sensoren aufgezeigt. Des Weiteren wird das Einbinden des USA in Kapitel 4.2 beschrieben.

Bei dem Steuer-PC handelt es sich um das Herzstück des Netzwerks, in welchem ein Anwender über eine Remote-Control-Steuerung die Kontrolle über einige Geräte des ihm zugehörigen VLANs besitzt. So wird das Messsystem mit der Software „imc Studio“ gesteuert, womit zugleich die Messergebnisse gespeichert werden. Weiterhin kann das USA angesteuert und ein PFC100-Controller für das Netzwerk der WAGO-Geräte umprogrammiert werden. Auch werden zwei *Recommended Standard* (RS)485-Schnittstellen zum einen für die Anbindung des Überspannungsschutzes und zum anderen für die Datenannahme des Barometers direkt an den Steuer-PC angeschlossen. Das USA bietet eine RS422-Schnittstelle, welche über einen RS422 zu *Universal Serial Bus* (USB) Konverter an den Steuer-PC Daten überträgt (siehe hellgrüne Leitung in Abb. 2.5).

Für den *Überspannungsschutz* (SPD) des Unternehmens Dehn eine eigene Steuereinheit benötigt. Der Aufbau der SPDs erfolgt über insgesamt sieben Steuereinheiten, da eine maximale Anzahl von zehn SPDs pro Einheit angeschlossen werden kann und eine Aufteilung auf mehrere Hutschienen erforderlich ist. Dabei werden die Steuereinheiten untereinander mit einer RS485-Schnittstelle verbunden, wobei eine Einheit als Master und die restlichen Einheiten als Slave betrieben werden. Über die Software "Status Display + Service Console" von Dehn können die Stati der SPDs der Sensor- und Datenleitungen über den Steuer-PC überwacht und eine Programmierung der Steuereinheiten vollzogen werden. So kann bei einer Fehlereerkennung eine Ferndiagnose der SPDs durch eine Remote-Control-Steuerung des Steuer-PCs durchgeführt werden. Dies gilt nicht für die SPDs der GNSS-Antennen, Ethernetleitung und des Drehstromnetzes.

Für die Stromversorgung, USV und Relais der Firma WAGO wird ein PFC100-Controller benötigt, welcher über verschiedene Module mit digitalen Ein- und Ausgängen ausgestattet ist. Diese werden über einen WAGO *Input/Output* (IO)-Link mit den zu kontrollierenden Geräten verbunden (siehe dunkelgrüne Leitung in Abb. 2.5) und können über die Software „e!Cockpit“ mittels CODESYS programmiert werden. Die folgende Tab. 2.1 zeigt die Module und Komponenten, welche für einen Netzwerkaufbau von WAGO benötigt werden.

Anzahl	Bezeichnung	Artikel-Nr.
1	PFC100-Controller	750-8101
1	16-Kanal-Digitaleingang (Modul)	750-1405
2	16-Kanal-Digitalausgang (Modul)	750-1500
1	Endmodul	750-600
1	IO-Link Master	750-657
2	Systemleitung	706-7753/301-200
4	14-pol. Interface Adapter	857-981
32	Relaismodul	857-304
1	3-Phasen-Leistungsmessung (Modul)	750-495
2	Kommunikationsmodul (Stromversorgungen)	2789-9080
2	Erdwiderstand-Signalisierungsmodul	789-665
1	e!Cockpit Software	2759-101

Tab. 2.1: WAGO Komponenten für eine Netzwerksteuerung der Relais, Netzteile und USV

Dabei werden die Module der digitalen Ein- und Ausgänge, der 3-Phasen-Leistungsmessung, des IO-Link Masters und das Endmodul direkt an den PFC100-Controller angeschlossen. Über die Systemleitungen können die digitalen Ausgänge mit den Interface Adaptern verbunden werden. Der Interface-Adapter wird wiederum an die Relais angeschlossen. Das Kommunikationsmodul der Stromversorgungen wird an den IO-Link Master angeschlossen. Die USV bietet nur die Möglichkeit, Informationen abzurufen und wird mit den digitalen Eingängen verbunden. Auch wer-

den die FI-Schalter und Erdwiderstand-Signalisierungsmodule mit den digitalen Eingängen verbunden, sodass eine Auslösung signalisiert werden kann.

Des Weiteren werden über die Software „e!Cockpit“ alle Geräte in den Controller integriert. Dabei wird im Anschluss dieser Arbeit ein *Graphical User Interface* (GUI) entwickelt, über welches die Geräte ansteuer- und auslesbar sind.

3 Einführung in den Begriff der Fehlertoleranz

Ein grundlegender Aspekt, welcher in dieser Arbeit behandelt wird, befasst sich mit dem Thema der Fehlertoleranz (Fault Tolerance). Dieser Begriff beschreibt die Eigenschaft eines Systems, seine Funktionsweise auch aufrechtzuerhalten, wenn unvorhergesehene Eingaben oder Fehler in der Hard- oder Software auftreten. So sollte im Idealfall bei einem „Bug“ in der Software das System weiterhin seine Aufgaben korrekt durchführen [6]. Historisch betrachtet, gewann die Fehlertoleranz mit dem Entwicklungsbeginn von Fluggeräten an Aufmerksamkeit und wurde besonders durch die Luft- und Raumfahrt sowie die militärische Industrie vorangetrieben. Um den Begriff der Fehlertoleranz auszuweiten, bedarf es einem Repertoire an unterschiedlicher Terminologie und diverser Analysemethoden, auf welche im Folgenden näher eingegangen wird.

3.1 Terminologie

3.1.1 Redundanz

Damit eine bessere Fehlertoleranz zustande kommt, kann dies mithilfe von Redundanzen (Redundancy) realisiert werden. Dabei muss zwischen homogener und heterogener Redundanz unterschieden werden. Homogen bedeutet, dass das gleiche Gerät ein zweites Mal verwendet wird. Dadurch können jedoch keine Entwicklungsfehler vermieden werden und das zweite Gerät würde bei solch einem Fehler überflüssig sein. Aus diesem Grund ist eine heterogene Redundanz die bessere Wahl, da durch verschiedene Geräte, welche dieselbe Aufgabe durchführen, die Wahrscheinlichkeit für ein Auftreten dieser Anomalie verringert wird. Beispielsweise werden bei Software unterschiedliche Codes und Programmiersprachen verwendet. Als Beispiel kann bei einem Tank der Füllstand über einen Drucksensor oder auch ein Radar ermittelt werden [7].

Beide Arten der Redundanz sind direkte Wege, dieselbe Aufgabe zu erfüllen. Aber es kann in der Not noch eine indirekte Redundanz Verwendung finden. Über eine Diversität an Sensoren, welche ihre eigenen Aufgaben erfüllen, kann eine ausgefallene Größe weiterhin z.B. über eine Ableitung anderer Werte ermittelt werden. Ein Fehler in der Messgröße würde sich mit der Zeit zwar akkumulieren, dennoch kann eine Art Schätzwert für den ausgefallenen Wert ermittelt werden (siehe Abb. 3.1). Ein

Beispiel hierfür ist die Verwendung eines Zeitmessers, eines Geschwindigkeits- und Beschleunigungssensors. Bei Ausfall eines Sensors kann dessen Wert durch eine Ableitung der beiden anderen Sensoren abgeschätzt werden.

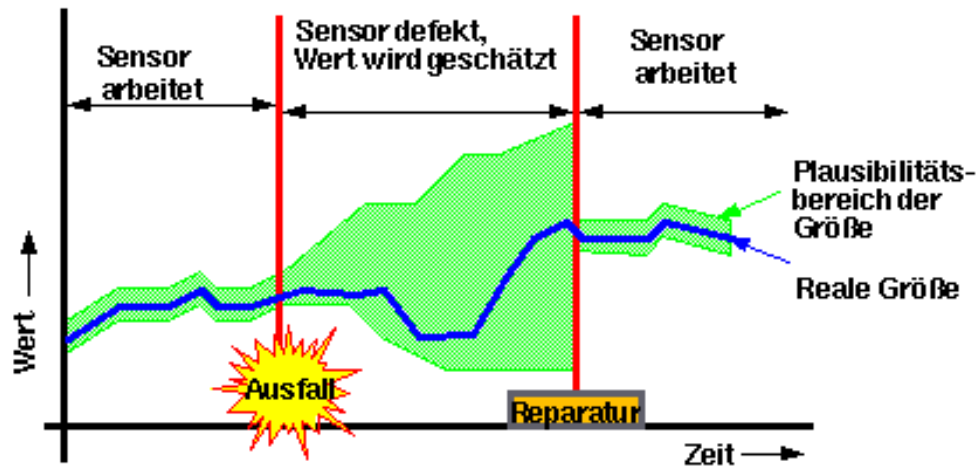


Abb. 3.1: Indirekte Redundanz über eine Schätzung bei einem Sensorausfall [7]

In den meisten Fällen ist diese Schätzung zu ungenau, sodass eine indirekte Redundanz kaum Verwendung findet. Zugleich geht damit nur eine geringe Fehlertoleranz einher.

Des Weiteren kann Redundanz auch zeitlich oder informativ erreicht werden [8]. Bei einer zeitlichen Redundanz wird eine Aktion wiederholt ausgeführt, da z.B. andere Störfaktoren wie destruktive Wellenüberlagerung bei einem Radar oder einer Funkverbindung eintreten kann. Die Informationsredundanz wird z.B. über die Verwendung zusätzlicher Bits bei einer Informationsweitergabe realisiert, um genau diese auf ihre Korrektheit überprüfen zu können. Dies kann beispielsweise über eine Vorwärtsfehlerkorrektur (eng.: Forward Error Correction) geschehen, bei welcher die Nachricht durch den Sender in redundanter Weise kodiert wird. Somit muss diese Nachricht bei einem Fehler nicht erneut durch den Empfänger angefragt werden muss.

3.1.2 Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit (Reliability) beschreibt ein fehlerfreies Operieren des Systems in einem bestimmten Zeitintervall $[t_0, t]$. Hierbei muss die Anfangsbedingung eines fehlerfreien Systems zum Zeitpunkt t_0 gegeben sein. Eine Unzuverlässigkeit ist dementsprechend das fehlerhafte Operieren in einem bestimmten Zeitintervall $[t_0, t]$.

Die Fehlertoleranz und Zuverlässigkeit unterscheiden sich insoweit, dass eine Beachtung der Fehlertoleranz die Zuverlässigkeit steigern kann, jedoch ein fehlertolerantes System nicht unbedingt eine hohe Zuverlässigkeit besitzt. So kann ein Systemdesign z.B. über Redundanzen zwar Fehler von Soft- oder Hardware kompensieren, jedoch kann die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers sehr hoch sein und damit eine geringe Zuverlässigkeit aufweisen. Andersherum kann zwar ein System mit einzelnen Komponenten eine hohe Zuverlässigkeit, jedoch im Fehlerfall eine niedrige Fehlertoleranz aufweisen.

Beschrieben wird die Zuverlässigkeit über die Kennzahl *Mean Time Between Failures* (MTBF), auf welche in Kapitel 3.1.4 näher eingegangen wird.

3.1.3 Verfügbarkeit

Eine Verfügbarkeit (Availability) beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass eine Funktion oder Daten zu einem bestimmten Zeitpunkt t zur Verfügung stehen. Berechnet werden kann diese über folgende Formel 3.1.

$$\text{Verfügbarkeit} = \frac{\text{Gesamtzeit} - \text{Gesamtausfallzeit}}{\text{Gesamtzeit}} \quad (3.1)$$

Abgegrenzt von der Zuverlässigkeit wird dieser Begriff durch das Zeitverhalten. Zuverlässigkeit wird in einem Zeitintervall und Verfügbarkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt angegeben. Ein System kann dennoch eine hohe Verfügbarkeit besitzen, wenn es zu häufigen Fehlern kommt, solange diese in einem sehr kurzen Zeitintervall auftreten. Somit hängt die Verfügbarkeit nicht nur mit der Häufigkeit eines Fehlers zusammen, sondern auch mit der Zeit, in welcher der Fehler repariert wurde.

Auch dieser Begriff kann über die Berücksichtigung einer Fehlertoleranz durch z.B. eine Redundanz verbessert werden. So kann in einem Computersystem ein zweiter Prozessor die Aufgabe ausführen, während der primäre Prozessor einer Reparatur unterzogen wird.

Trivial ausgedrückt können die Begriffe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit folgendermaßen definiert werden [8]:

- Verfügbarkeit: Das System ist sofort verwendbar.
- Zuverlässigkeit: Das System läuft fortwährend ohne Fehler.

3.1.4 Mean Time Between Failures

Die MTBF beschreibt die "mittlere Betriebsdauer zwischen zwei Ausfällen" eines Bauteils oder Systems und dient als Kennzahl für die Zuverlässigkeit [9]. Weiterhin kann diese als Inputfaktor für weitere Kennzahlen wie z.B. der Verfügbarkeit verwendet werden.

Für eine Ermittlung dieser wird zunächst die Ausfallrate λ (Failure Rate) eines Systems definiert. Dabei wird ausgehend von einem fehlerfreien Zeitpunkt t_0 die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls (t_0, t) angegeben. Diese Rate setzt sich zum einen aus der Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte $f(t)$ und zum anderen der Überlebenswahrscheinlichkeit bzw. Zuverlässigkeit $R(t)$ zusammen.

$$\lambda(t) = \frac{dF(t)}{dt} \frac{1}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \text{ mit } R(t) = 1 - F(t) \quad (3.2)$$

$F(t)$ stellt in Formel 3.2 die Verteilungsfunktion der Lebensdauer eines Systems dar und gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass die Lebensdauer kleiner oder gleich t ist. Addiert mit der Überlebenswahrscheinlichkeit ergibt sich ein Wert von Eins. Bildet man die Ausfallrate über der Lebensdauer ab, so entwickelt sich eine sogenannte Badewannenkurve (siehe Abb. 3.2).

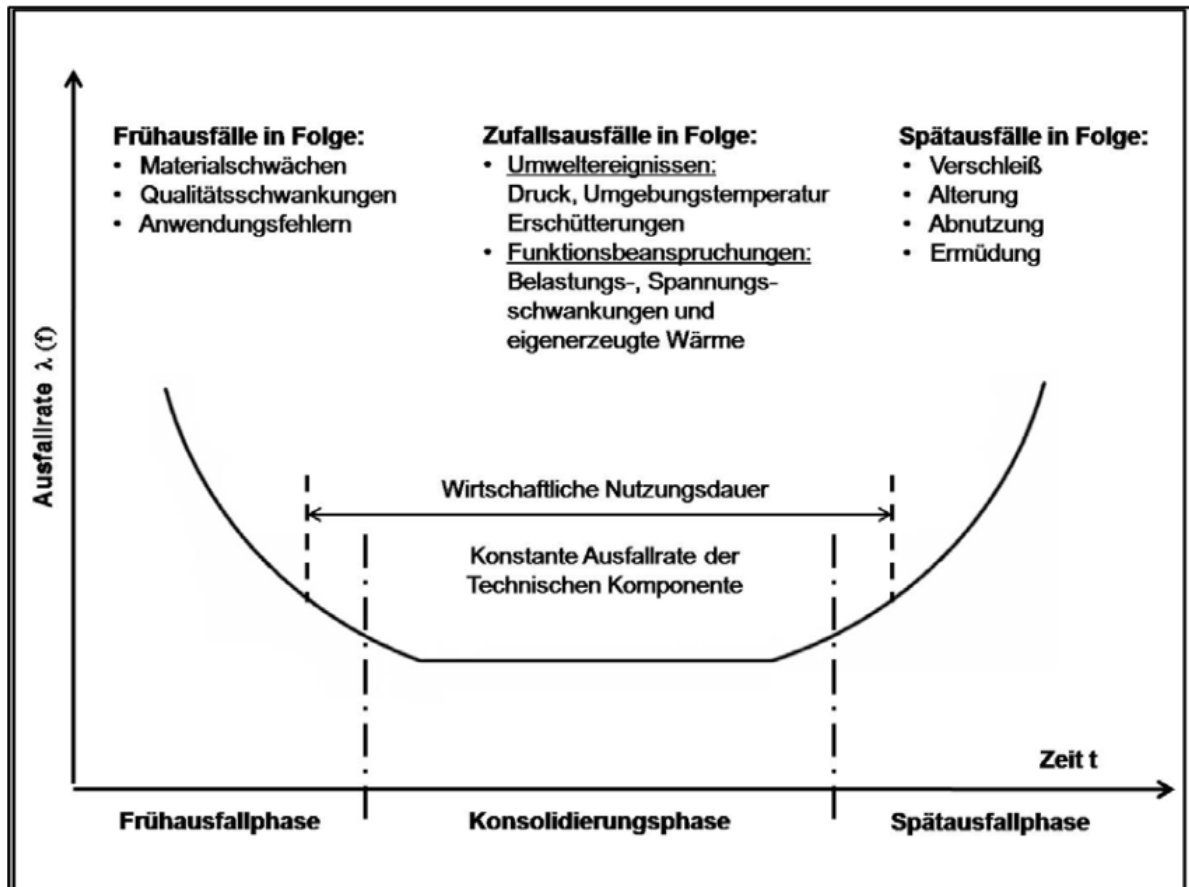


Abb. 3.2: Verlauf der Ausfallrate über der Zeit [9]

Jedoch wird für eine praktische Verwendung die Ausfallrate als konstanter Wert angegeben, welcher sich aus der Konsolidierungsphase ergibt:

$$\lambda = \frac{\text{Anzahl der Ausfälle}}{\sum \text{Betriebsdauern}} \quad (3.3)$$

Die Errechnung der MTBF eines einzelnen Bauteils kann aus der DIN Norm 40041 Nr. 3.5.3 entnommen und mit Hilfe einer arithmetischen Mittelung der Verfügbarkeitszeiten TV_i realisiert werden (siehe Formel 3.4). Dabei wird die MTBF nach [10] als „Erwartungswert zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ausfällen“ bezeichnet.

$$MTBF = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n TV_i \quad (3.4)$$

Weiterhin kann eine Berechnung gemäß Formel 3.5 über das Integral der Überlebenswahrscheinlichkeit bzw. Zuverlässigkeit erfolgen.

$$MTBF = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} = \frac{\sum \text{Betriebsdauern}}{\text{Anzahl der Ausfälle}} \quad (3.5)$$

Formel 3.5 zeigt außerdem, dass die MTBF dem Kehrwert der Ausfallrate λ entspricht und somit über Formel 3.6 zum Erhalt der Zuverlässigkeit $R(t)$ führt.

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{MTBF}} \quad (3.6)$$

Bei Systemen, welche nicht repariert werden können, kann nicht von einem Auftreten zweier aufeinander folgender Ausfälle ausgegangen werden. Aus diesem Grund wird der Wert *Mean Time To Failure* (MTTF) nach [11] als „mittlere Betriebszeit bis zum Ausfall“ definiert. Dabei sind zwei unterschiedliche Angaben zu beachten. Zum einen wird die gesamte Lebensdauer bis zu einem endgültigen Scheitern der Komponente betrachtet. Zum anderen wird die mittlere Zeit von einem reparierten System bis zu einem erneuten Ausfall als MTTF verwendet. So kann über eine *Mean Time To Recovery* (MTTR) ein Zusammenhang zwischen MTBF und MTTF hergestellt werden (siehe Formel 3.7).

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (3.7)$$

Die MTTR wird im deutschen als mittlere Zeit für eine Wiederherstellung einer Funktion übersetzt und gibt dementsprechend die Zeit an, welche vom Start des Fehlers bis zu einer vollständigen Reparatur vergangen ist. Diese sollte so kurz wie möglich gehalten werden, da hierdurch die Verfügbarkeit eines Systems beeinträchtigt und mit steigender MTTR verringert wird. Dabei sollte beachtet werden, dass die Abkürzung MTTR unterschiedlichen Definitionen entsprechen kann. Diese sind [12]:

- **Mean Time To Repair:** Mittlere Zeit, welche für eine Reparatur benötigt wird. Diese beinhaltet die Zeit für eine Reparatur und eines Tests. Als Beispiel eignet sich ein Hausbrand, wobei die Dauer des Löschvorganges und regelmäßiger Sichtprüfungen gezählt wird.
- **Mean Time to Respond:** Mittlere Zeit, die ab dem Zeitpunkt der Fehlerdetektion für eine Reparatur benötigt wird. Dabei wird die Zeit der Reparatur und Reaktionszeit nach der Detektion berücksichtigt. Bei einem Hausbrand zählt die Zeit ab dem Alarm des Feuermelders bis zu einem vollständigen Löschvorgang.

- **Mean Time To Recovery:** Mittlere Zeit, welche für eine Wiederherstellung von einem Systemfehler benötigt wird. Dies umfasst die Zeit des Ausfalls bis hin zu einer Reparatur. Das Beispiel des Hausbrands lässt sich so ausweiten, dass die Zeit des Auftretens des ersten Funkens bis zum vollständigen Löschvorgang gezählt wird.
- **Mean Time To Resolve:** Mittlere Zeit, die für eine Aufklärung und Verhindern eines Systemfehlers benötigt wird. Dies beinhaltet nicht nur die Zeit des Ausfalls bis hin zu einer Reparatur, sondern auch die Zeit der Implementierung, um eine Wiederholung des Fehlers zu vermeiden. Der Hausbrand wird damit nicht nur gelöscht, sondern das Haus wird danach einer Brandschutzrenovierung unterzogen.

Daher ist es wichtig, die verwendete MTTR vorher genau zu definieren. Zumeist wird MTTR als Mean Time To Repair verstanden, welche jedoch zeitlich gesehen der in dieser Arbeit genannten Mean Time To Recovery entspricht. Dabei wird zu der reinen Reparaturzeit die Zeit der Meldung und Fehlersuche wegen einer einfacheren Verständlichkeit mit einbezogen.

Die folgende Abbildung gibt einen zusammenhängenden Aufschluss über alle mittleren Zeiten, die genannt wurden.

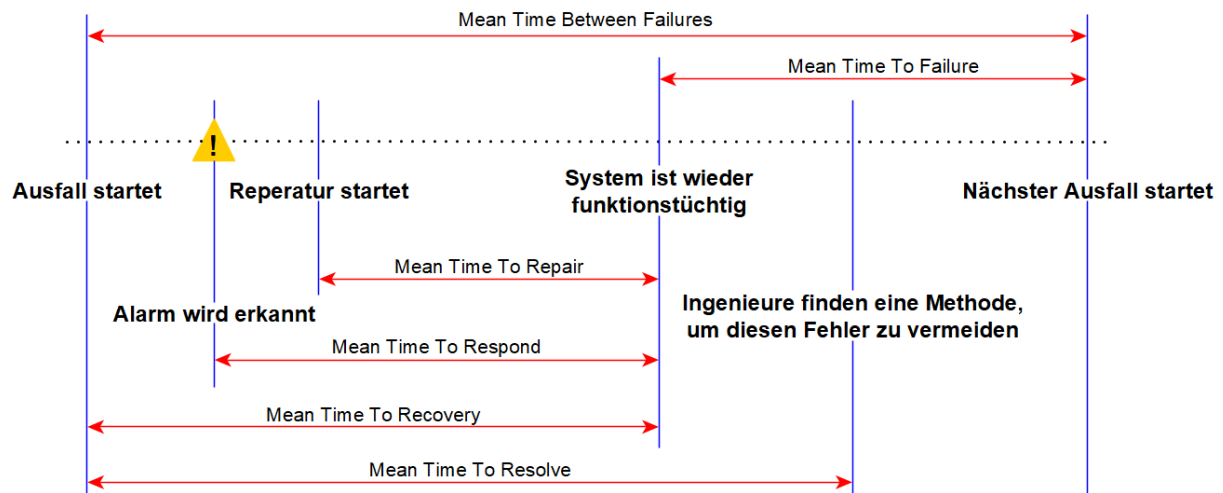


Abb. 3.3: Zusammenhänge der einzelnen mittleren Zeiten

3.2 Analysemethoden

Da ein Systemdesign bei einem Fehler diesen so schnell wie möglich reparieren muss, um einen gefahrlosen Weiterbetrieb gewährleisten zu können, sollten zuvor

Fehleranalysen (Failure Analysis) in verschiedenen Formen durchgeführt werden. Hierdurch können über ein angepasstes Systemdesign vorhersehbare Fehlerfälle vermieden werden. Dennoch wird keine 100-prozentige Fehlertoleranz erreicht werden können, da nicht alle Fehlerfälle eines Systems verhindert werden können. Man kann zwar über eine beliebig häufige Duplizierung Redundanzen erzeugen und so dem Maximum von 100 % näher kommen, dies würde aber hohe Kosten und Komplexität erzeugen. Aufgrund dieser Problematik ist immer ein Kompromiss zwischen Kosten, Leistung und Fehlertoleranzgrad zu entscheiden [7].

In Systemen, welche über eine einfache Fehlertoleranz verfügen, können Fehler auch über zwei einfache Methoden kompensiert werden. Dies ist zum einen die Fehlersicherheit (eng.: Fail Safe). Hierbei wird bei einem Erkennen einer Anomalie ein sicherer stabiler Betriebszustand eingenommen und solange gehalten, bis die Ursache behoben wurde. Ein Beispiel hierfür ist ein erhitzter Druckkessel, welcher bei einer Drucküberschreitung oder einem Sensorfehler die Wärmequelle abschaltet. Zum anderen kann eine sanfte Rückstellung (eng.: Fail Graceful) vollzogen werden, bei welcher das System zwar weiterarbeitet, aber dies nicht in einem vollen Umfang seiner Funktionen und Geschwindigkeit durchführt. Beispielsweise kann eine Eisenbahn beim Ausfall des Kontrollrechners immer noch den nächsten Bahnhof erreichen, da ein Weiterfahren mit Sichtgeschwindigkeit erlaubt ist [7].

Um den Begriff der Fehleranalyse detaillierter zu erläutern, werden im Folgenden sechs allgemeine Einstufungen in eine Klasse einer bestimmten Fehlertoleranz beschrieben. Mit steigender Nummerierung weisen die Einstufungen einen höheren Grad der Komplexität und des Aufwandes ([7], [13]):

- 0. Keine Fehlertoleranz:** Das System besitzt mindestens eine Stelle, welche im Fehlerfall zu einem Verlust der kritischen Funktion führt. Im Englischen wird dies als „single point of global failure“ bezeichnet.
- 1. Erhalt der kritischen Funktion:** Die kritische Funktion wird bei jedem Fehlerverhalten aufrechterhalten. Nicht-kritische Funktionen dürfen jedoch ausfallen.
- 2. Degradierung:** Kritische Funktionen dürfen nicht ausfallen und nicht-kritische Funktionen teilweise verloren gehen. Diese werden begrenzt bzw. degradiert.
- 3. Temporale Degradierung:** Nicht-kritische Funktionen dürfen ausfallen. Jedoch wird eine Rekonfiguration der Systeme durchgeführt, welche zu einem

Wiederausführen der ausgefallenen Funktionen führt, sodass nur über eine gewisse Zeitspanne ein Ausfall geschieht. Kritische Funktionen dürfen weiterhin nicht ausfallen.

4. **Vollständige Fehlertoleranz:** Trotz vorhandener Anomalien und Ausfälle behält das System seine Funktionen über einen begrenzten Zeitraum vollständig weiter. Es dürfen weder bemerkbare Fehler zustande kommen, die über eine schnelle Rekonfiguration bearbeitet werden, noch darf ein single point of global failure auftreten. Redundanzen müssen über unterschiedliche Komponenten realisiert und getrennt voneinander platziert werden. Bei einem Ausfall kann mit Hilfe einer Rekonfiguration zu einer redundanten Einheit die Funktion weiterhin ausgeführt werden. Um die Fehlertoleranz nach einem Fehlerfall oder in einem bestimmten Zeitintervall aufrecht erhalten zu können, werden die Komponenten in regelmäßigen Abständen gewartet bzw. repariert. Dazu dürfen diese heruntergefahren und aus dem Betrieb genommen werden. Als Beispiel für diese Kategorie ist ein Luftfahrzeug zu nennen.
5. **Nonstop (eng.: continuous availability):** Das System besitzt die gleichen Anforderungen wie bei Stufe vier, jedoch muss eine Wartung der Soft- sowie Hardware und ein Komponentenaustausch im laufenden Betrieb ermöglicht werden. Ein Beispiel hierfür ist das bundesweite Stromnetz. Andere Systeme wie z.B. Satelliten, welche nicht mehr von einem Menschen betreten werden können¹, müssen durch eine Rekonfiguration und andere Fehlerschutzmechanismen bis zu ihrem unvermeidbaren Versagen arbeiten. Darüber hinaus können Softwarefehler über eine Funkverbindung im Nachhinein korrigiert werden.

Für den Schaltschrank und den IECplus-Masten wird ein Fehlertoleranzgrad von drei bis vier angestrebt, sodass dauerhaft Messdaten aufgenommen und eingesehen werden können.

Bei mehreren Fehlern gleichzeitig wird die Gefahr einer Fehlerverkettung und -fortpflanzung (Fault Propagation) durch das System erhöht. Auch bei einem

¹ Einzige Ausnahme war das Hubble Space Telescope, welches mithilfe des Space Shuttles fünf Male gewartet wurde. Jedoch sind die Kosten einer Wartung immens hoch, was ein Ausfallen des Satelliten zu einem späteren Zeitpunkt unvermeidbar macht.

dem realen Sensorwert vergleicht. Als letztes können Regeln eingefügt werden, welche harte Grenzen für den Sensorwert darstellen und diesen nur in einem für dieses Szenario realistischen Bereich als fehlerfrei anerkennen. Dabei können die zwei letzten Methoden auch für ein Duplex- oder Simplexsystem verwendet werden.

Um einen sinnvollen Wert für eine Redundanz bzw. die Notwendigkeit einer Redundanz herauszufinden und verschiedene Fehlerfälle in einem System dokumentieren zu können, sollten zuvor mit den bestehenden Komponenten verschiedene Analysemethoden durchgeführt werden. Weiterhin sollten auch schon während dem Designprozess eines Systems und bei einem Kauf die MTBF oder ähnliche Werte für eine Beschreibung der Fehleranfälligkeit berücksichtigt werden. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden dafür die grundlegenden Aspekte und Herangehensweisen einer Fehlerbaumanalyse und *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) erläutert.

3.2.1 Fehlerbaumanalyse

Die Fehlerbaumanalyse (Fault Tree Analysis) berechnet aufgrund der verschiedenen Ausfallwahrscheinlichkeiten der einzelnen Geräte den Ausfall des gesamten Systems. Dabei können Teilsysteme für eine bessere Übersichtlichkeit gebildet werden. Bei diesem Ansatz werden die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten eines bestimmten Fehlers von oben nach unten (eng.: Top-Down) bzw. von größeren Systemen in detailliertere Einzelgeräte und weiter in Komponenten- sowie Bauteilebene durchgeführt. Hierbei führt eine Betrachtung der Bauteilebene wie Widerstände oder Kondensatoren zu einem sehr komplexen Bild, wodurch sich die Systemzusammenhänge ebenfalls komplex und oftmals schwerer verständlich darstellen. Die Vorgehensweise für eine korrekte Durchführung ist in der kommerziellen Norm IEC-61025 oder speziell für die Luftfahrt in der *Aerospace Recommended Practice* (ARP)-4761 beschrieben ([14], [15]).

Die Fehler werden hauptsächlich über zwei verschiedene Operatoren miteinander verrechnet. Dies ist zum einen ein UND-Operator (AND), bei welchem die Wahrscheinlichkeiten addiert werden. Dabei müssen alle Komponenten in dieser Verknüpfung ausfallen, damit das System, welches ein Level darüber liegt, ausfällt. Zum anderen handelt es sich um einen ODER-Operator (OR). Bei dieser werden die Wahrscheinlichkeiten miteinander multipliziert, weil jeder Ausfall einer Komponente zu einem Totalausfall des Systems führt. Abb. 3.5 zeigt eine partielle Fehlerbaumanalyse

anhand eines Hochauftriebssystems in einem Luftfahrzeug mit in rot dargestellten Erläuterungen des jeweiligen Ereignisses. Zusätzlich sind die Fehlerwahrscheinlichkeiten zu jedem System angegeben, welche in einer *Flugstunde* (FH) auftreten.

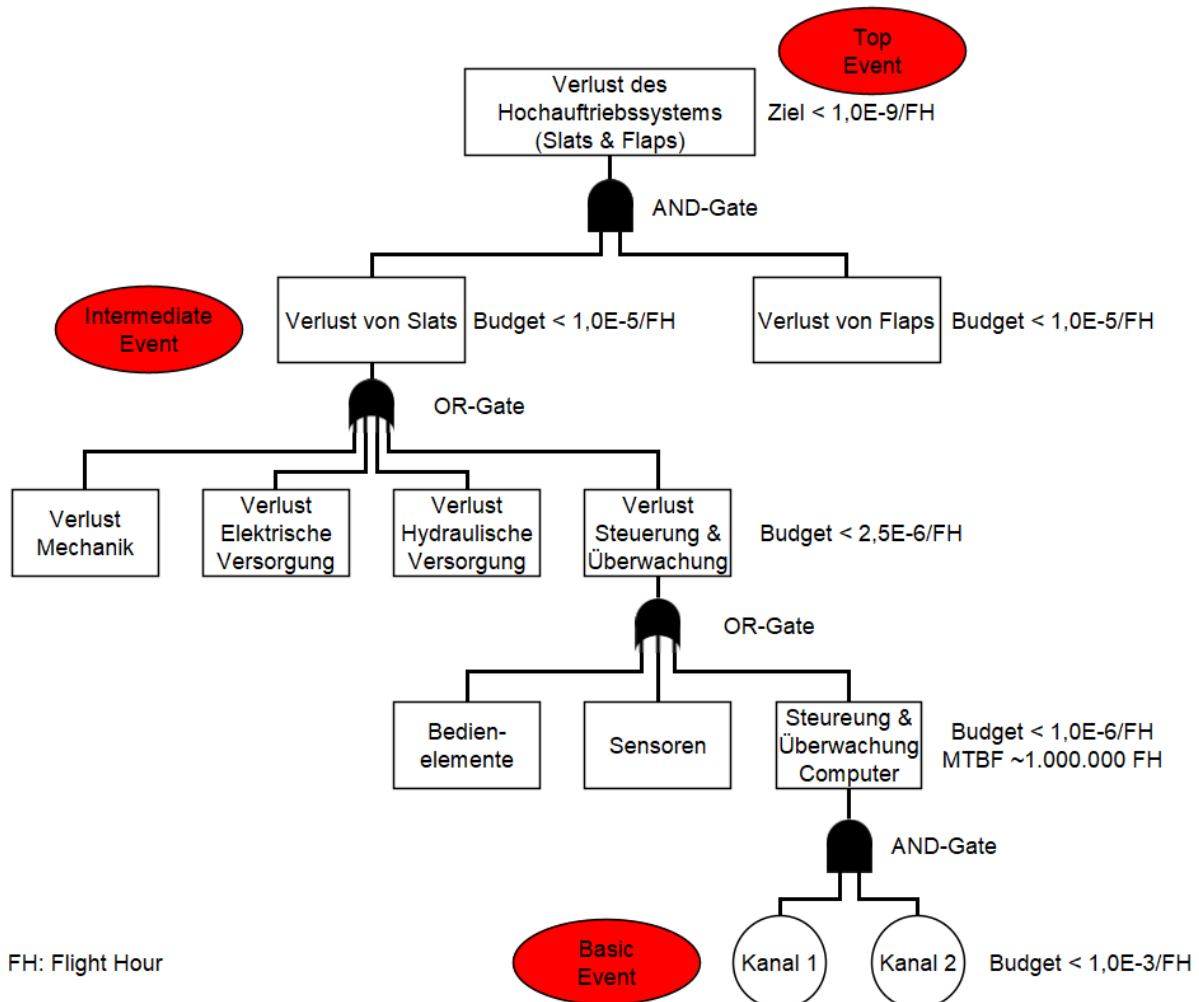


Abb. 3.5: Fehlerbaumanalyse am Fallbeispiel eines Hochauftriebssystems in einem Luftfahrzeug [14]

Durch eine Fehlerbaumanalyse werden Einzelereignisse und ihr Zusammenspiel mit verschiedenen multiplen Ursachen für einen Ausfall des obersten Systems erkennbar. So zeichnet sich ein „single point of global failure“ durch ODER-Operatoren aus, die von dem untersten bis in das oberste System eine Fehlerverkettung verursacht. Damit ist selbst ohne Zahlenwerte für eine Fehlerwahrscheinlichkeit eine quantitative Analyse der Zusammenhänge möglich und der Systemdesigner kann darauf reagieren sowie weitere Redundanzen hinzufügen. Bei Bekanntheit der Ausfallwahrscheinlichkeiten kann sogar jeweils eine Wahrscheinlichkeit für das oberste System errechnet werden und diese Analyse trägt mit qualitativen Ansätzen dazu bei, die geforder-

ten Wahrscheinlichkeiten aus den Standards, wie es in der Luft- und Raumfahrt gefordert ist, einzuhalten.

3.2.2 Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

In einer *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) werden Fehlerzustände von unten nach oben (eng.: Bottom-Up) bzw. von einer Bauteilebene über Komponenten bis hin zu einem System definiert und anschließend eine Priorisierung dieser Zustände durchgeführt. Dabei wird die Fragestellung „Was passiert, wenn ...?“ als Grundprinzip genutzt und es werden somit einzelne Anomalien sowie deren Auswirkung auf das darüber liegende System analysiert [14]. Beispielsweise wird auf Bauteilebene überprüft, was ein kurzgeschlossener oder offener Widerstand für eine Auswirkung auf den Stromkreis bzw. die Leiterkarte besitzt. Bei extern erworbenen Systemen, bei welchen solche Informationen durch den Hersteller nicht gegeben werden, kann mit diesem System als unterste Ebene angefangen werden. Eine gute Übersicht über die Herangehensweise gibt die Aufschlüsselung der einzelnen Wörter, welcher in einer FMEA enthalten sind, mithilfe eines Beispiels aus der Luftfahrt [16].

- **(F) Fehler eines bestimmten Bauteils oder Systems:** Betrachte ein Bauteil in einem System.
 - Stromversorgung der Cockpitbeleuchtung
- **(M) Modus des Fehlers:** Betrachte einen Weg, bei welchem das Bauteil oder System versagen kann.
 - Verlust der Stromversorgung der Cockpitbeleuchtung
- **(E) Effekte des Fehlers:** Bestimme die Effekte des Fehlermodus, welche auf das zu untersuchende System zutreffen.
 - Verlust des kompletten Systems der Cockpitbeleuchtung
- **(A) Analyse des Fehlers:** Analysiere, wie groß der Einfluss dieses Fehlers auf die Systemumgebung, Menschen oder Umwelt ist.
 - Ein dunkles Cockpit verursacht ein belästigendes Gefühl bei den Piloten

Durchgeführt wird eine FMEA in tabellarischer Form, welche im MIL-HDBK-338 folgendermaßen gestaltet ist [17]:

- **Element:** Name des Elements
- **Code:** Identifikation des Elements
- **Funktion:** Prägnante Beschreibung der Funktion des Elements
- **Fehlerzustand:** Prägnante Beschreibung des Fehlers
- **Fehlereffekt:** Erklärung des Effekts jedes Fehlerzustands auf die Leistungsfähigkeit des nächst höher gelegenen Elements
- **Verlustwahrscheinlichkeit:** Numerischer Wert der Wahrscheinlichkeit für einen Systemausfall, wenn das Element den jeweiligen Fehlerzustand einnimmt

Weiterhin werden Teilschritte ausgeführt, damit die Wirkung des Fehlers sowie seine Auftritts- und Detektionswahrscheinlichkeit analysiert werden können. Darauf folgt eine Einteilung in verschiedene Priorisierungen der einzelnen Fehlerfälle und es wird eine Rangfolge erzeugt, um somit Präventivmaßnahmen nach einer geordneten Struktur realisieren zu können. Diese Einteilung kann mithilfe der Ordnungszahlen „1“ bis „10“ und einem Bewertungskatalog durchgeführt werden. So werden folgende Definitionen für folgende Begriffe erzeugt [18]:

- **Bedeutung (engl.: Severity):** Als Bedeutung wird eine Schätzung durchgeführt, welche die Schwere des Effekts auf die nächst höhere Komponente darstellt.
 - hoch = „10“ bis gering = „1“
- **Aufttrittswahrscheinlichkeit (eng.: Occurrence):** Die Aufttrittswahrscheinlichkeit sagt in einer qualitativen Weise aus, wie wahrscheinlich das Auftreten des betrachteten Fehlers ist.
 - unvermeidbar = „10“ bis sehr unwahrscheinlich = „1“
- **Entdeckungswahrscheinlichkeit (eng.: Detection):** Bei der Entdeckungswahrscheinlichkeit wird eine Schätzung durchgeführt, wie wahrscheinlich die Detektion des betrachteten Fehlers ist.
 - gering = „10“ bis hoch = „1“

Die Aufteilung kann eine Unternehmens- oder Sektorabhängigkeit aufweisen. In der Luftfahrt ist dies beispielsweise durch die ARP-5580 und ARP-4761 definiert. Zusätz-

lich können das frei verfügbare MIL-HDBK-338 [17] und der MIL-STD-1629 [19] für eine Vorgehensweise und den Bewertungskatalog herangezogen werden.

Bei der Entwicklung von neuen Systemen, für welche unzureichend historische Daten vorliegen oder das Risiko in einem Zusammenhang mit menschlichen Versagen noch unbekannt ist, sollte eine unvermeidbare Auftretswahrscheinlichkeit („10“) angenommen werden. Eine Priorisierung der einzelnen Anomalien geschieht über die sogenannte *Risikoprioritätszahl* (RPN, Risk Priority Number)), die über Formel 3.8 berechnet wird.

$$RPN = B \cdot A \cdot E \quad (3.8)$$

Das B steht dabei für die Zahl der Bedeutung, das A für die der Auftretswahrscheinlichkeit und das E für die der Entdeckungswahrscheinlichkeit. So entsteht ein Bereich von 0 bis 1000 Punkten, welcher in folgende Abschnitte für eine Bewertung der RPN unterteilt werden kann (siehe Tab. 3.1).

RPN	Fehlerrisiko	Handlungsbedarf	Maßnahmen
RPN Bereich 1 (z.B. 192-1000)	Hoch	Dringender Handlungsbedarf	Maßnahmen zur Risikoreduzierung sind erforderlich. Kann das Risiko nicht weiter reduziert werden, muss dies ebenfalls dokumentiert und bewertet werden.
RPN Bereich 2 (z.B. 72-191)	Mittel	Handlungsbedarf	Maßnahmen, die das Risiko so gering wie vernünftigerweise möglich halten (ALARP – As Low As Reasonably Practicable).
RPN Bereich 3 (z.B. 1-71)	Niedrig / akzeptabel	Kein zwingender Handlungsbedarf	Keine weiteren Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos erforderlich. Das Team kann jedoch bei Bedarf weitere Verbesserungen untersuchen und nachverfolgen. Ein Restrisiko bleibt bestehen.

Tab. 3.1: Unterteilung der RPN in Abschnitte [18]

Da die RPN sich immer nur auf das betrachtete Gesamtsystem bezieht, ist eine Einteilung der 1000 Punkte in die Abschnitte für jedes Gesamtsystem unterschiedlich auszumachen. Die RPN sollte daher nur als qualitativer Ansatz für eine Übersicht gesehen werden, ob die Fehler der einzelnen Systeme ausreichend kompensiert werden. So kann sich eine RPN von 60 auch aus verschiedenen Faktoren der Bedeutung, Auftrittswahrscheinlichkeit und Detektion ergeben. Generell sollte ein Bauteil mit einer hohen Bedeutung immer kritisch betrachtet werden.

Weiterhin kann eine Kritikalitätsanalyse der einzelnen Fehlerzustände, die in einer FMEA identifiziert wurden, durchgeführt werden. Damit kann die Auswirkung des Fehlers auf das Gesamtsystem in verschiedene Kritikalitätsstufen eingeteilt werden und der Begriff der FMEA wird zu einer *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis* (FMECA) ausgedehnt. Dabei kann man bei einer bekannten Ausfallwahrscheinlichkeit λ und weiteren Faktoren einen quantitativen Ansatz mit einer Modalkritikalität CR_m für den betrachteten Fehlerzustand ausmachen (siehe Formel 3.9).

$$CR_m = \alpha \cdot \beta \cdot \lambda \cdot t \quad (3.9)$$

Der Wert α gibt die Häufigkeit dieses Fehlers unter allen anderen Fehlerzuständen bei diesem System an. Um die Wahrscheinlichkeit zu beschreiben, mit welcher die eigentliche Aufgabe des betrachteten Systems durch den auftretenden Fehlerzustand nicht mehr ausgeführt werden kann, wird die Verlustwahrscheinlichkeit β genutzt. Der Wert t stellt die Operationszeit dar. Summiert man nun alle Modalkritikalitäten des betrachteten Systems und aller einzelnen Systeme, so erhält man die Kritikalität des Gesamtsystems und kann darüber eine Aussage treffen, in wie weit dieses durch Fehler gefährdet ist (siehe Formel 3.10).

$$CR_S = \sum_i \sum_j (CR_m)_{ij} \quad (3.10)$$

CR_S gibt einfach ausgedrückt die Ausfallwahrscheinlichkeit des Gesamtsystems bzw. die Rate der auftretenden Fehler pro Zeiteinheit an.

3.2.3 Vergleich einer FMEA zu einer Fehlerbaumanalyse

Bei einer FMEA handelt es sich um eine Bottom-Up-Methode (siehe Abb. 3.6), welche qualitativ die Fehlerzustände sowie ihre Wirkungen in einem frühen Designstadi-

um aufzeigt und über verschiedene Designiterationen kontinuierlich ausgeführt wird. Über eine zusätzliche Kritikalitätsanalyse durch das Ermitteln von Ausfallwahrscheinlichkeiten der untersten Ebene kann eine quantitative Aussage über das Auftreten von Anomalien auf das Gesamtsystem getroffen werden. Besonders herausstechend sind die Identifikation von „single point of global failures“ und die Bereitstellung einer Grundlage für das Design und den Einbauort von Geräten, welche zur Leistungsüberwachung und Fehlererkennung genutzt werden [17]. Jedoch wird durch eine FMEA kein perfektes Design umsetzbar sein, sondern vielmehr wird sie als Hilfsmittel für ein besseres Design verwendet. So ist sie als eine logische Buchführung von Fehlern während dem Designprozess zu sehen. Weiterhin können Bauteilprobleme wie eine hohe Ausfallwahrscheinlichkeit nicht direkt an diesem gelöst, sondern nur auf die Problemstellung aufmerksam gemacht werden, sodass ein anderes Bauteil ausgewählt wird. Es wird nur der Einzelfehler betrachtet und Zusammenhänge zwischen mehreren Fehlern sind nicht ersichtlich.

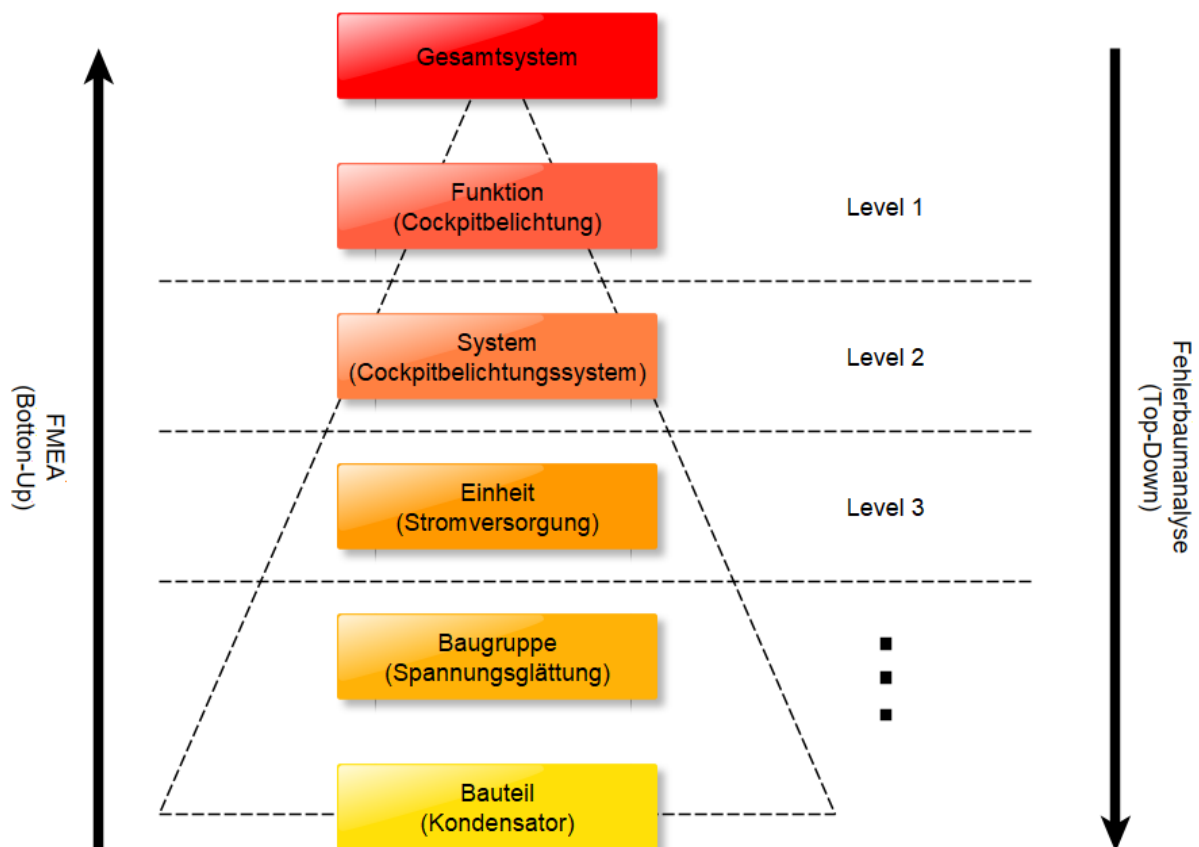


Abb. 3.6: Top-Down- und Bottom-Up-Ansatz für eine Realisierung einer Fehleranalyse

Die Fehlerbaumanalyse wird über den gegenteiligen Ansatz mit einer Top-Down-Methodik durchgeführt, welche den Schwerpunkt auf die höher gelegenen Systeme bzw. Events und deren multiplen Fehlerkombinationen legt. Besonders bei komplexen Systemen werden kritische Ausfälle sichtbar, die z.B. durch mehrfache unkritische Fehler entstanden sind. Auch diese Analysemethode wird im frühen Designstadium eingesetzt und begleitet das Design über mehrere Iterationen hinweg bis zum Abschluss. Weiterhin ergibt sich eine einfache Übersicht, ob die schon eingeführten Redundanzen bzw. alternativen Korrekturrouten einen positiven Effekt auf das Gesamtsystem ausüben. Auch können während des Ausführens Prozeduren für eine Wartung und Tests von kritischen Fehlermöglichkeiten erstellt werden.

4 Beschreibung der Messtechnik

Die Messtechnik umfasst alle notwendigen Geräte, welche für eine Aufnahme, Speicherung und Abrufung der Daten über das Netzwerk zuständig sind. Eine allgemeine Auflistung und Erläuterung wurde bereits in Kapitel 2.2 vollzogen. In diesem Kapitel liegt der Fokus jedoch auf der Anbindung und Bedienung der folgenden Geräte:

- Sensorik (siehe Kapitel 2.2.1)
- Steuer-PC
- Messsystem

Dabei wird die Sensorik über mehrere analoge Schnittstellen an das Messsystem angeschlossen. Dieses ist wiederum mit dem Steuer-PC verbunden, sodass eine Aufnahme und Speicherung dieser Messdaten erfolgen kann. Weiterhin werden Messdaten des Barometers zusätzlich über eine RS485-Schnittstelle und des USA über eine RS422-Schnittstelle direkt an den Steuer-PC übertragen. Das USA verfügt darüber hinaus über eine Ethernet-Schnittstelle, welche die Daten an den Steuer-PC übergibt.

Kapitel 4.1 gibt Aufschluss über diese Verbindungen und der Konfiguration des Messsystems. Das USA wird über ein eigenständig programmiertes Fremdgeräteinterface in die Messsoftware eingebettet (siehe Kapitel 4.2). Im Anschluss zeigt Kapitel 4.3 die Inbetriebnahme der oben beschriebenen Geräte sowie einen Systemtest.

4.1 Anschluss der Sensoren und Konfiguration der Messanlage

Bei der Messanlage handelt es sich um eine imc BUSDAQflex mit zwei CANSASflex-CI8 Messmodulen. Diese können insgesamt bis zu 16 analoge Schnittstellen differentiell erfassen und für eine Spannungs-, Strom-, Temperatur- oder Widerstandsmessung konfiguriert werden (siehe Abb. 4.1).



Abb. 4.1: Messsystem imc BUSDAQflex (links) und Messmodul CANSASflex-CI8 (rechts) ([20], [21])

Jeder Sensor verfügt über eine bis vier analoge Schnittstellen, welche je nach gemessenem Wert in ihrer Spannung oder ihrem Strom variieren. Die Messmodule werden für eine Strommessung eingestellt und die Sensoren, welche nur eine Spannungsmessung erlauben, über einen Bürdenwiderstand für eine Strommessung transformiert.

Eine Konfiguration des Messsystems und Aufnahme der Messdaten ist über das Installieren der Software „imc Studio“ mit dem Steuer-PC möglich. Dort werden die einzelnen Kanäle ausgewählt und passend zu dem dort angeschlossenen Sensor der streng lineare Ausgangsstrom mit den Minimal- sowie Maximalwerten zusammengebracht. Dabei ergibt sich folgende Konfiguration:

Steckerpositionen	Anzahl / Sensor	Schnittstelle(n)		Sensormessbereich
4	4x Schalensternanemometer	1x 4 – 20 mA		0,3 – 75 m/s
3	3x Windfahne	1x 4 – 20 mA		0 – 360 °
1	1x Barometer	1x 4 – 20 mA		300 – 1100 hPa
2	1x Thermo-Hygrogeber	2x	4 – 20 mA	0 – 100 % r. F.
			4 – 20 mA	-40 – 60 °C
1	1x Niederschlagswächter	1x	4 – 8 mA	0 – 0,01 mm/min
			8 – 12 mA	0,01 – 0,1 mm/min
			12 – 16 mA	0,1 – 1 mm/min
			16 – 20 mA	1 – 10 mm/min
4	1x Ultraschallanemometer	4x	4 – 20 mA	-60 – 60 m/s
			4 – 20 mA	-60 – 60 m/s
			4 – 20 mA	-60 – 60 m/s
			4 – 20 mA	-50 – 60 °C

Tab. 4.1: Sensoren mit zugehörigen Messbereichen und der Steckerposition am Messsystem

4.2 Programmierung eines Fremdgeräteinterface

Eine spezielle Anbindung an das Messsystem erhält das USA, welches dort oder direkt am Steuer-PC angeschlossen und über eine Ethernet-Schnittstelle kommuniziert wird. Die Messsoftware „imc Studio“ erlaubt es, Daten über eine Ethernet-Schnittstelle in Empfang zu nehmen und für eine korrekte Darstellungsweise bzw. Speicherung in der Software neben den anderen Sensorwerten zu realisieren. Dieses sogenannte Fremdgeräteinterface wird über die Programmiersprache C# mit teilweise eigenen Befehlen des Herstellers imc umgesetzt.

Eine erste Erfahrung mit der Datenverarbeitung des USA über das Fremdgeräteinterface wurde im Rahmen einer studentischen Arbeit gesammelt. über eine Betreuung einer Studienarbeit im Rahmen eines dualen Studiums durchgeführt. Die Er-

kenntnisse und Ergebnisse können in [22] nachgelesen werden. Die Programmierung basiert auf dem Ansatz, den Datenstream des USA in seine Bytes und Bits aufzuteilen, in korrekt deklarierte Variablen zu schreiben und mit einem Zeitstempel aus dem Datenstream zu versehen. So wurden insgesamt 85 Variablen erfasst und in imc Studio gespeichert und dargestellt.

Im Anschluss wurde eine eigenständige Weiterentwicklung des Programmes durchgeführt, bei der kleinere Fehlerbehebungen und weitere Funktionen implementiert wurden. So wurde zum einen ein automatisches Wiederverbinden der TCP-Verbindung bei Abbruch durch einen Timeout und zum anderen ein korrekter Zeitstempel in UTC programmiert. Außerdem wurde das Speicherformat der Variablen an deren Anforderung angepasst.

4.3 Inbetriebnahme und Durchführung eines Systemtests

Im Anschluss an die Programmierung wurde das USA für eine erste Testmessung außerhalb eines Gebäudes aufgebaut und in einer Langzeitmessung über mehrere Stunden betrieben (siehe Abb. 4.2 und Abb. 4.3). Dabei wird das USA an eine Elektronikbox (USA-Box 1) angeschlossen. Diese wird im realen Betrieb auf Höhe des USA an den Messmasten integriert. Weiterhin wird sich im Schaltschrank eine zweite Box (USA-Box 2) befinden, welche die Signal- und Stromleitungen auf die passenden Stecker aufteilt. Das Ethernet-Kabel wird an einen Switch angebunden, um die Realität im späteren Schaltschrank abzubilden. Ein Arbeitslaptop mit der Software „imc Studio“ wird mit diesem Switch verbunden, sodass alle Voraussetzungen für eine Datenaufnahme über das Fremdgeräteinterface erfüllt sind. Als weiteres Aufnahmegerät wurde ein Messsystem der Firma imc mit den vier analogen Schnittstellen des USA an den Switch angeschlossen, sodass auch hier die spätere Realität für das USA abgebildet wird. Jedoch handelte es sich hierbei nicht um das spätere Originalmesssystem mit den korrekten Messmodulen. Im Anschluss konnte eine Verbindung der Messsoftware sowohl zu dem Messsystem als auch zu dem USA hergestellt werden.

Um zusätzlich einen Fehler über den Zeitstempel des USA ausschließen zu können, wurde dieses in einen NTP-Modus versetzt und als NTP-Server die *Internet Protocol* (IP)-Adresse des Arbeitslaptops eingestellt. Dieser wiederum kann mittels Windows 10 mit wenigen Einstellungen in der Registry als NTP-Zeitserver fungieren

und die Zeitangabe als UTC+0 eingestellt werden. Das USA bietet über ein Kommandozeilen-Interface wie beispielsweise die Software „PuTTY“ eine Kommunikations- und Einstellungsmöglichkeit an. Dort lässt sich der NTP-Server mit seiner Zeit und einer Abweichung abfragen. Erst wenn diese Werte nach einem Starten angezeigt werden, ist eine Zeitsynchronisation des USA aktiv.

Für eine korrekte Interpretation der Spannungswerte der analogen Schnittstellen, welche über einen $50\ \Omega$ Bürdenwiderstand für eine Strommessung transformiert werden, muss zum einen eine Einstellung getroffen werden, welche Werte des USA übertragen werden sollen. Dies geschieht erneut über ein Kommandozeilen-Interface und es wurde sich für Windgeschwindigkeiten in X-, Y- und Z-Richtung sowie die akustische Temperatur entschieden [22]. Darüber hinaus kann mit Hilfe eines Spannungs-Offsets, der die kleinste Zahl des entsprechenden Wertes darstellt, die Auflösung des Signals angegeben werden. Um ein angenehmes Signal-Rausch-Verhältnis zu erhalten, wurde sich an die Empfehlung des Herstellers aus [23] gehalten und ein Offset von 20% eingestellt. Der daraus resultierende Wertebereich beträgt 4 mA bis 20 mA. Zum anderen muss dieser Wertebereich mit den dazugehörigen Minimal- und Maximalwerten für eine lineare Interpretation im Messsystem bzw. der Messsoftware eingestellt werden.

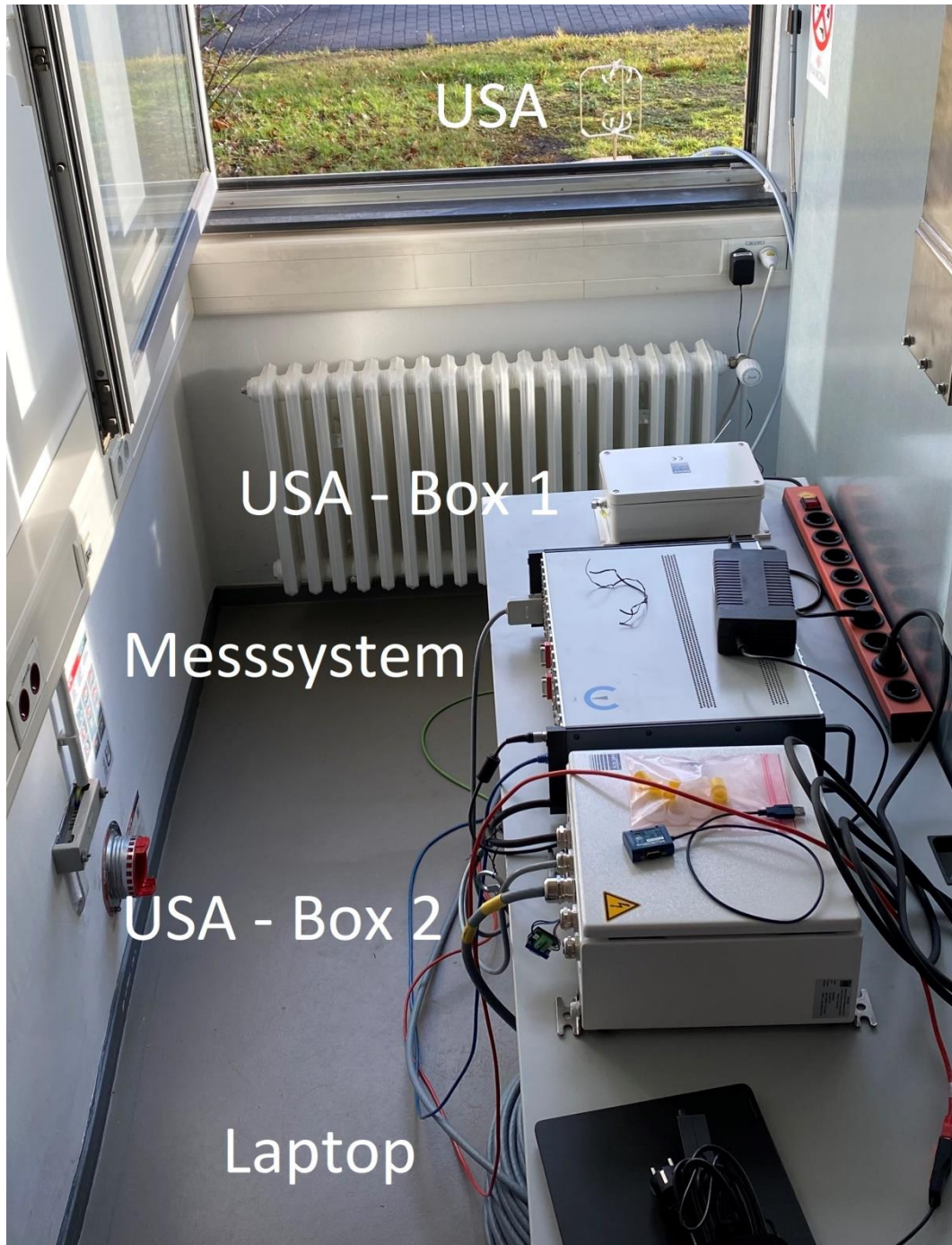


Abb. 4.2: Versuchsaufbau einer Testmessung des USA in einer realen Umgebung (innerer Aufbau)



Abb. 4.3: Versuchsaufbau einer Testmessung des USA in einer realen Umgebung
(äußerer Aufbau)

Die Ergebnisse werden in der Messsoftware über mehrere Koordinatensysteme dargestellt und sind in Abb. 4.4 bis Abb. 4.6 zu sehen. Da bei einem Übereinanderlegen der Windgeschwindigkeiten in X-, Y- oder Z-Richtung der analogen Ergebnisse mit denen aus dem Fremdgeräteinterface große Unterschiede erkannt wurden, sind nur die Daten aus der Ethernet-Verbindung dargestellt. Eine Untersuchung des Problems ergab einen Defekt der Messmodule, sodass die analogen Daten verworfen werden müssen. Dabei wurde eine korrekte Ausgabe der Spannung des USA mit einem Multimeter festgestellt. Im späteren Systembetrieb wird durch die doppelte Anbindung eine einfache Redundanz dieser vier Werte gewährleistet und damit ein Fehler einer Datenschnittstelle kompensiert. Ein weiterer Testbetrieb mit dem im Schaltschrank verwendeten Messsystem wird nach dieser Arbeit durchgeführt.

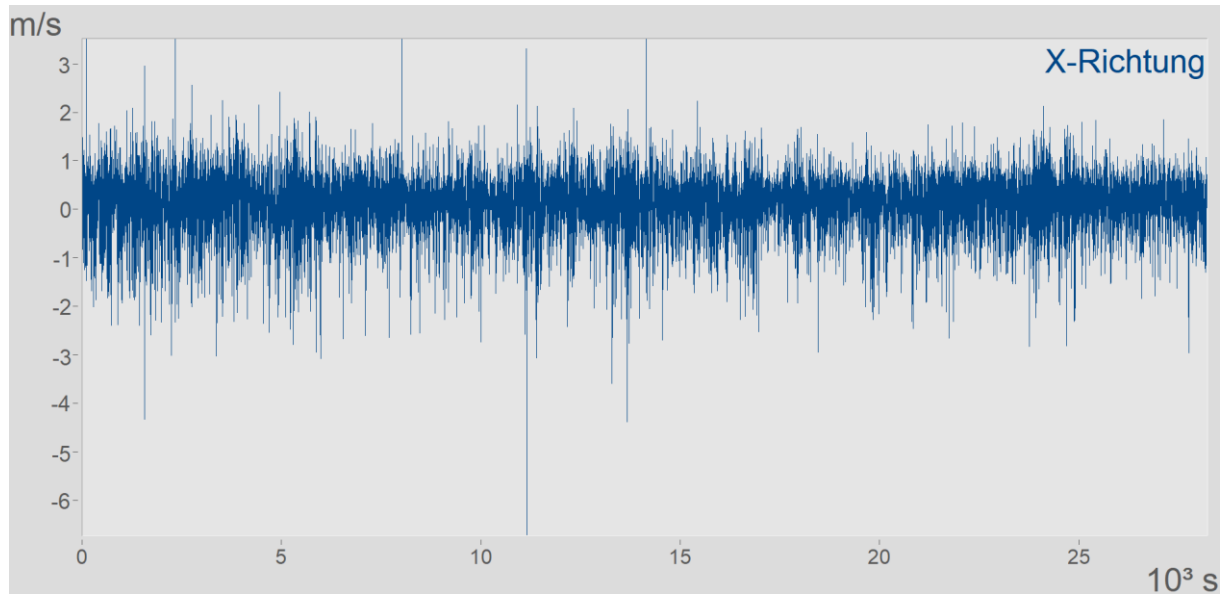


Abb. 4.4: USA Langzeitmessung der Windgeschwindigkeit in X-Richtung

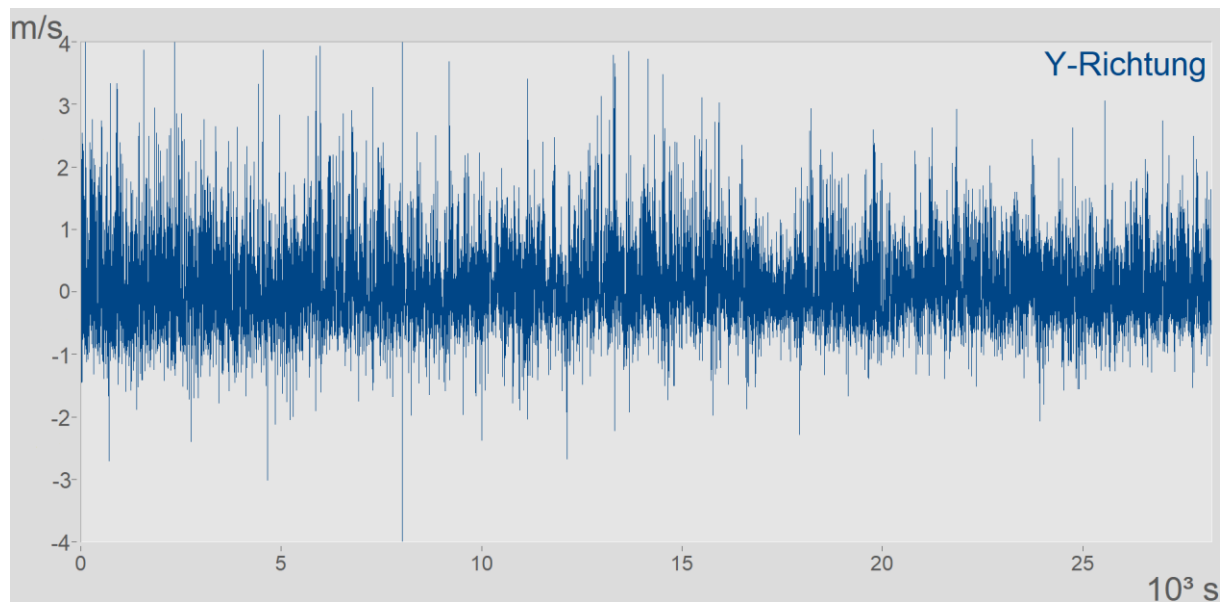


Abb. 4.5: USA Langzeitmessung der Windgeschwindigkeit in Y-Richtung

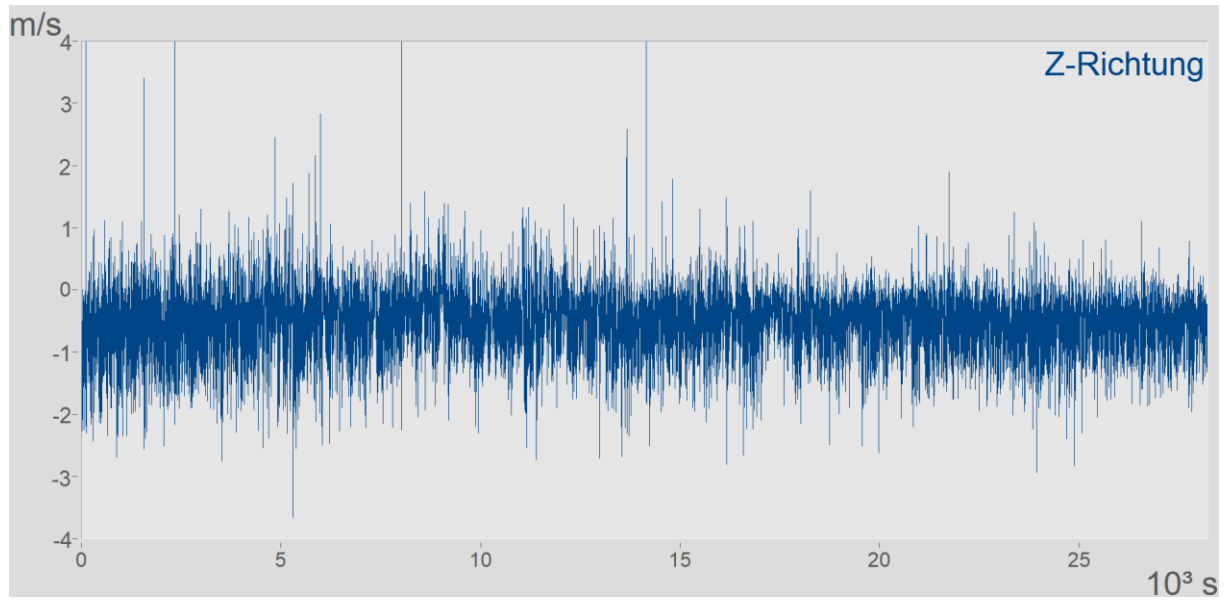


Abb. 4.6: USA Langzeitmessung der Windgeschwindigkeit in Z-Richtung

5 Beurteilung der Fehlertoleranz

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist, einen Überblick der verschiedenen Fehlermöglichkeiten zu erstellen und aufgrund dessen eine Beurteilung hinsichtlich der Fehlertoleranz zu erstellen. Das System des Schaltschranks wird so gestaltet, dass dieses ein fehlertolerierendes Verhalten aufweist. Dazu wurde zunächst eine FMEA für jedes Gerät durchgeführt. Weiterhin wurde eine Fehlerbaumanalyse ausgeführt, durch die der Top-Down Ansatz zu einer Übersicht der Systeme und ihren einzelnen Fehlerpfaden führt. Es wird zunächst ein Überblick der Fehler einzelner Geräte dargestellt, welcher in Kapitel 5.2 aus einem anderem Betrachtungswinkel über menschliche, technische und Umweltfehler charakterisiert wird. Zum Schluss wird eine wirtschaftliche Betrachtung vollzogen, ob Redundanzen in Betracht gezogen werden müssen, welche Faktoren dazu geführt haben und wie sich dies auf den finanziellen Aspekt des Projektes auswirkt.

5.1 Analyse des Gesamtsystems

Um eine bessere Übersicht über die FMEA zu geben, wird diese in dieser schriftlichen Arbeit nicht in Tabellenform beschrieben, sondern in einer umfassenden Schriftform mit weiteren Erklärungen dargestellt. Je nach Herstellerangaben und Informationsgehalt aus der Literatur variiert die Ausführlichkeit der einzelnen Komponenten. Eine tabellarische Variante findet sich in [24] und ist im Anhang unter Kapitel A.4 hinterlegt.

Des Weiteren wird nicht die vollständige Fehlerbaumanalyse dargestellt, sondern eine Auswahl der wichtigsten und aussagekräftigsten Ergebnisse genannt. Eine vollständige Fehlerbaumanalyse kann in [25] und im Anhang unter Kapitel A.5 eingesehen werden.

5.1.1 Firewall

Um eine Sicherheit der Sensordaten und Steuerung der Geräte gegenüber einem unbefugten Zugriff zu besitzen, wird eine Firewall in das Netzwerkdesign hinzugefügt. Dabei handelt es sich um eine Hardware-Firewall, um das gesamte Netzwerk und nicht nur den Steuer-PC bzw. einzelne Komponenten über eine geräteeigene Software-Firewall schützen zu können. Eine Hardware-Firewall bietet den Vorteil, Malwa-

re oder andere Angriffsmethoden sofort zu blockieren, bevor diese auf den im Netzwerk befindlichen Geräten zugreifen können. Bei einer reinen Software-Firewall würde die schädliche Software schon auf der Netzwerkkomponente installiert werden und nur durch den dauerhaften Einsatz der Firewall blockiert werden [26].

Eine Firewall kann unterschiedliche Fehler aufweisen, welche durch technische, menschliche oder Umweltfaktoren ausgelöst werden können. Bei den Auswirkungen eines Fehlers handelt es sich um solche, die in die beiden Kategorien „Leak“ und „*Denial-of-Service*“ (DoS) eingegrenzt werden können. Ein „Leak“ stellt einen Zugriffspunkt für einen Angreifer dar, um die Firewall zu umgehen und vollen Zugriff auf das interne Netzwerk zu erhalten. Ein DoS Fehler bedeutet, dass ein berechtigter Nutzer durch die Firewall blockiert wird und damit keinen Zugriff auf das interne Netzwerk erlangt. [27]

So können beide Auswirkungen durch transiente oder permanente Fehler ausgelöst werden. Transiente Fehler sind schwer zu identifizieren, da diese zeitlich begrenzt auftreten. Jedoch kann ein Angreifer diesen Fehler genauso schwer ermitteln und ausnutzen. Ausgelöst werden kann dieser z.B. durch einen Stromausfall auf Hardwareebene oder einen Überlauf von Speicherpuffern (Buffer) auf Softwareebene. Permanente Fehler hingegen sind zeitlich unbegrenzt und stellen eine wesentlich größere Gefahr für das Netzwerk dar. Beispielsweise kann ein sogenannter „stuck-at-1“- oder „stuck-at-0“-Fehler bei der Authentifizierung durch ein Passwort auftreten. Bei einem „stuck-at-1“ kann nach der Authentifizierung auch ein unbefugter Zugriff stattfinden, da das Gateway der Authentifizierung „offen“ bleibt und somit ein „Leak“ geschaffen wurde. Ein „stuck-at-0“-Fehler hingegen verweigert den Zugriff auch für berechnigte Personen, da das Gateway dauerhaft geschlossen bleibt und damit zu einem DoS führt. Vermieden werden kann speziell dieser Fehler über selbstüberwachende Schaltkreise, die einen „stuck-at-1“- und „stuck-at-0“-Fehler identifizieren können [27].

Weiterhin kann eine Einteilung in zufällige und gewollte Störungen erfolgen. Im Fall eines zufälligen Fehlers ist dieser für einen befugten Nutzer aber genauso für einen Angreifer schwer zu identifizieren und wird damit auch eher sehr unwahrscheinlich ausgenutzt. Ein Angreifer besitzt die Intention, das Netzwerk zu infiltrieren. Dies kann auch über eine gewollt hervorgerufene Störung von innerhalb oder außerhalb des Netzwerks sowie eine geteilte Informationsquelle wie einen Switch verur-

sacht werden. Beispielsweise sind ein Trojanisches Pferd oder ein Virus als Quelle zu nennen. Von außerhalb kann eine einzelne DoS- oder DDoS-Attacke über ein verteiltes Rechnernetz des Angreifers mittels einer großen Anzahl an Anfragen an die Firewall zu einem DoS führen. Dabei existieren diverse Methoden, welche zu einer Überlastung der Systemressourcen führen. An dieser Stelle können HTTP-, Ping-, SYN- oder UDP-Flood genannt werden [30]. Gegen diese Art von Attacken können folgende Maßnahmen implementiert werden [30]:

- **IP-Sperrlisten:** Eine Sperrliste identifiziert kritische IP-Adressen und verwirft die Datenpakete dieser direkt, bevor eine Bearbeitung durchgeführt wird.
- **Filterung:** Bei einer Filterung kann ein Grenzwert für die Datenmenge in einer bestimmten Zeit eingestellt werden, sodass ein DoS durch externe Angreifer nicht zustande kommen kann. Jedoch kann bei gleichzeitiger Anfrage mehrerer berechtigter Nutzer die Filterung einen DoS auslösen. Der Wert der Filterung sollte daher mit Bedacht eingestellt werden.
- **SYN-Cookies:** Diese Art von Cookies führt zu einer Auslagerung der Informationen von *Synchronize* (SYN)-Paketen bei einem TCP Verbindungsaufbau vom internen Speicher der Firewall zu einem Crypto-Cookie, welcher an den Angreifer zurück geschickt wird. So wird der Angriff von dem Speichersystem in die Rechenkapazität der Firewall umgeleitet.
- **Load-Balancing:** Bei einer Implementierung mehrerer Firewalls können die Anfragen auf die verschiedenen Systeme aufgeteilt werden, sodass eine einzelne Firewall keinen DoS aufweist.

Eine niedrige Integrität der Informationsbasis einer Firewall stellt eine weitere Fehlerquelle dar. Dabei handelt es sich um Dateien, welche z.B. für Passwörter oder eine Konfiguration verwendet werden [27]. Besonders während dem Hochfahren einer Firewall oder dem Konfigurieren des Betriebssystems besteht die Gefahr eines Überschreibens durch einen Angreifer. Auch kann eine zufällige Beschädigung dieser Dateien zu einer Störung führen. Um dies zu verhindern, wurden von der Industrie diverse Lösungen durch Echtzeitvergleiche mit Backup-Dateien entwickelt.

Ein Verbindungsaufbau zu dem Netzwerk des Schaltschranks wird über eine Anmeldung mit einem Benutzernamen und einem Passwort ermöglicht. Jedoch kann über ein Passwort, das eine niedrige Integrität aufweist, ein Angreifer dennoch einen Zugriff erlangen. Genauso kann ein Mitschneiden der Kommunikation zwischen ei-

nem Benutzer und der Firewall Informationen für ein Eindringen in das Netzwerk übermitteln. Um dies zu verhindern, wird eine verschlüsselte Verbindung über *Secure Shell* (SSH)-, *Transport Layer Security* (TLS)- und *Virtual Private Network* (VPN)-Protokolle etabliert [28]. Dies wird auch durch einen Sicherheitsexperten, welcher die Kompromittierbarkeit von Netzwerken eines Windparks erforscht hat, empfohlen [29].

Des Weiteren kann eine Störung durch die Hard- oder Software ausgelöst werden. Dabei können die Bauteile der Firewall einen Fehler aufweisen, welchen sich ein Angreifer zunutze machen kann. Genauso kann eine inkorrekte Softwareimplementierung oder ein fehlerhaftes Design zu Störungen führen. Auch ist ein korrektes Anforderungsmanagement der Firewall durch den Entwickler notwendig, da durch Ausnahme-Listen bzw. Regeln eine Liste für erlaubte und unbefugte Aktionen und Nutzer erstellt werden muss. Die Implementierung dieser Regeln stellt dabei eine weitere Fehlerquelle dar.

Allgemein lässt sich zusammenfassen, dass die Wahrscheinlichkeit eines „Leaks“ durch eine Reihenschaltung von mehreren Firewalls verkleinert werden kann. Bei einem DoS hingegen sind parallele Firewalls der korrekte Lösungsansatz, um weiterhin Zugriff auf das interne Netzwerk zu erhalten. Dabei wird jedoch nur die Anzahl der Anfragen durch einen Angreifer erhöht, denen die Firewalls standhalten können. Eine genügend große Anzahl an Anfragen kann immer zu einem DoS führen. Somit führt eine Kaskadierung bzw. Redundanz mittels einer Heterogenität und Individualisierung zu einer niedrigeren Wahrscheinlichkeit einer Infiltration durch einen Angreifer oder Blockierung des Services, als es durch eine einzelne, teure und sehr gut konfigurierte Firewall der Fall ist [27]. Jedoch ist mit einer zweiten Firewall ein höherer Wartungsaufwand verbunden und eine größere Pfadverzögerung bei Kontaktierung des Netzwerkes wird stattfinden. Aufgrund der Kommunikation der redundanten Firewalls über ein sicheres Protokoll, wie es beispielsweise die *Knowledge Query and Manipulation Language* (KQML) ist, kann weiterhin die Sicherheit gesteigert werden. Hierbei können Informationen des Angreifers ausgetauscht werden ([31], [32]).

Weiterhin können Protokoll-Dateien in einer Firewall je nach Anforderung des Benutzers erstellt werden. Dies drosselt jedoch die Anzahl an Paketen in einem Zeitintervall, da ein Teil der Leistung für das Protokollieren verwendet wird. Auch würde eine zu große Anzahl an Protokoll-Dateien zu einem sehr großen Aufwand bei einer

Fehlersuche führen und es muss ein ausgewogenes Verhältnis gefunden werden. Aus diesen Gründen sollte eine Protokollierung weitestgehend minimiert werden.

5.1.2 Mobilfunkmodul

Das Mobilfunkmodul stellt die Verbindung des Netzwerks des Schaltschranks mit dem mobilen Internet dar und ermöglicht somit einen Zugriff auf dieses. Die beinhalteten Computerkomponenten ähneln denen des Steuer-PCs und werden in Kapitel 5.1.7 näher beschrieben.

Ein Unterschied zu dem Steuer-PC liegt in der Funktion, die über eine LTE-Antenne eine Funkverbindung zu einem Mobilien Provider herstellen soll. Dabei ist die Netzabdeckung des ausgewählten Providers von großer Bedeutung und die Auswahl dieses Providers muss dementsprechend für eine LTE-Verbindung am Standort Krummendeich ausgelegt sein. Jedoch können Wartungsarbeiten, menschliche Fehler oder die Witterungsverhältnisse die Qualität der Verbindung beeinflussen und bis zu einem Komplettausfall führen. So reflektieren und streuen die Wassertropfen in Wolken bzw. Nebel auf dem Boden, Feuchtigkeit, und Niederschlag jeglicher Art das Signal [33]. Dies führt zu einem schwächeren Signal, wobei die Dämpfung von der verwendeten Frequenz anhängig ist. Auch nimmt die Zusammensetzung der Moleküle und Elemente in der Luft einen gewissen Einfluss auf das Signal. Aus diesen Gründen wird eine zweite heterogene SIM-Karte verwendet, welche eine Verbindung mit einem anderen Provider aufbaut. Die Entscheidung der beiden ausgewählten Provider wurde anhand der Netzabdeckung des Standortes für eine LTE-Verbindung getroffen (siehe Abb. 5.1 bis Abb. 5.3).

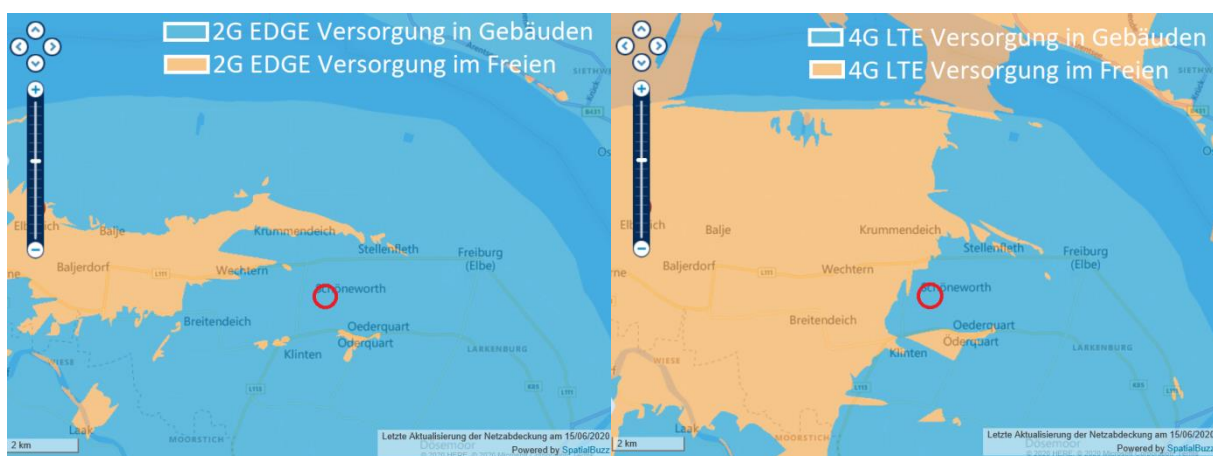


Abb. 5.1: Netzabdeckung der Telefonica Germany für 2G EDGE (links) und 4G LTE (rechts) mit dem Standort des Messmastes (roter Kreis) [34]

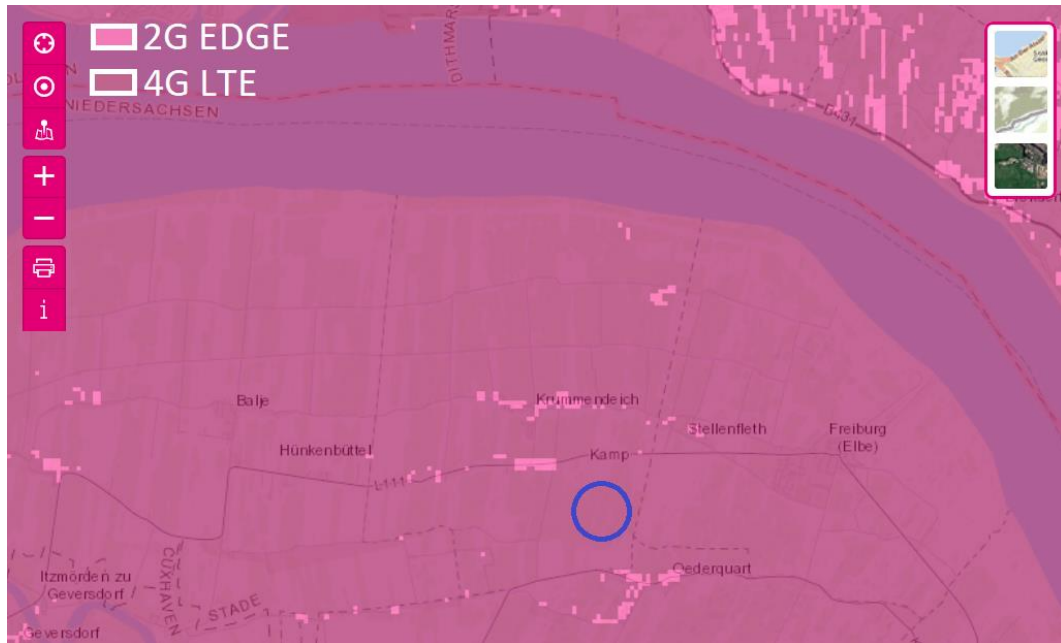


Abb. 5.2: Netzabdeckung der Deutschen Telekom für 2G EDGE und 4G LTE mit dem Standort des Messmastes (blauer Kreis) [35]

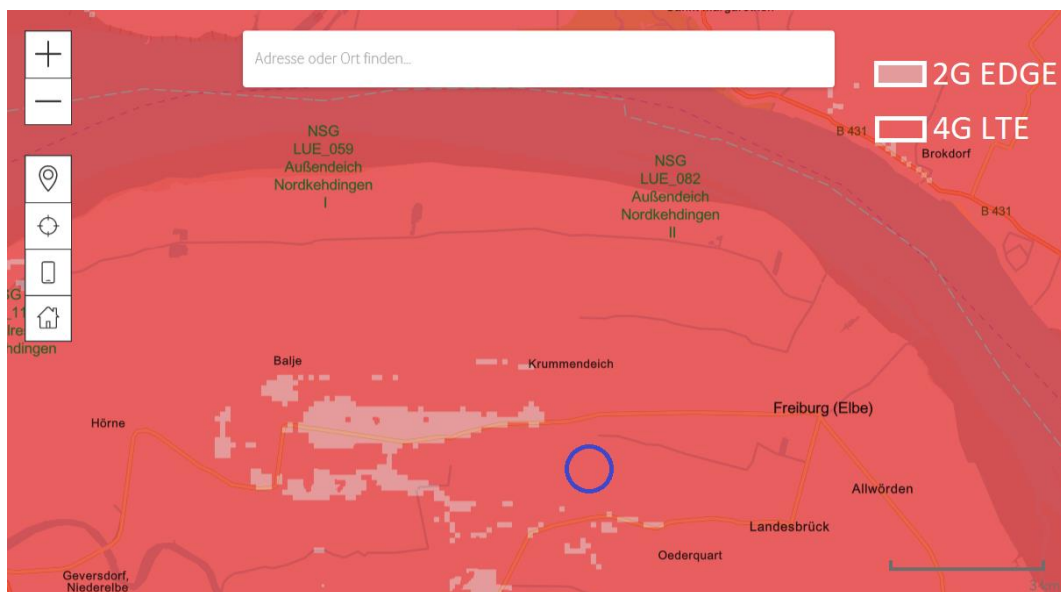


Abb. 5.3: Netzabdeckung der Vodafone für 2G EDGE und 4G LTE mit dem Standort des Messmastes (blauer Kreis) [36]

Eine 2G EDGE Verbindung reicht für eine Kommunikation mittels einer *Short Message Service* (SMS) an das Mobilfunkmodul aus und ist flächendeckend etabliert. Laut den Netzabdeckungskarten aller drei Provider ist eine 4G LTE Verbindung durchgehend mit dem Mobilfunkmodul möglich.

Um die Verbindung mit dem Internet zu überprüfen, bieten manche Mobilfunkmodule einen „Watchdog“ an. Im Allgemeinen handelt es sich dabei um eine Funktion,

die für eine Erkennung eines Ausfalls implementiert wurde. Im Fall des Mobilfunkmoduls überprüft dieser regelmäßig die Verbindung mit dem Internet, indem Pakete im *Internet Control Message Protocol* (ICMP)-Format an einen individuell definierten ICMP Detection Server geschickt werden [37]. Kommt es zu einem Timeout, so führt das Mobilfunkmodul selbstständig einen Neustart durch. Beachtet werden muss, dass ein ICMP Detection Server mit einer hohen Erreichbarkeit ausgewählt wird.

Weiterhin werden SMS-Dienste angeboten, mit welchen in einer Zugriffsliste definierte Telefonnummern Befehle verschicken und Statusnachrichten erhalten können [37]. Darüber kann beispielsweise die Verbindung zum Internet über eine SMS gesteuert oder eine Fehlermeldung selbstständig durch das Mobilfunkmodul verschickt werden.

Bei einem Ausfall des Mobilfunkmoduls würde die Messung nicht beeinflusst werden, da die Daten unabhängig davon auf dem Steuer-PC gespeichert werden. Jedoch wäre die Steuerbarkeit von der Ferne aus nicht mehr möglich.

5.1.3 Netzwerk-Switches

Die Netzwerk-Switches im Schaltschrank-Design müssen unterschiedliche Anforderungen erfüllen und werden aus diesem Grund individuell ausgelegt. Dennoch besitzen sie allgemeine Gemeinsamkeiten in ihren Fehlerquellen und ihrem Fehlverhalten.

So kann ein Port, sei es eine *Registered Jack* (RJ)45 oder *Small Form-factor Pluggable* (SFP) Verbindung, durch Verschmutzungen verunreinigt werden und die Kontakte können den Strom nicht mehr korrekt leiten. Jedoch kann dieses Fehlverhalten durch eine Reinigung des Ports beseitigt werden. Ein inkorrektes Einstecken der Verbindungen kann zu einer Beschädigung des Steckers oder Ports führen, so dass dort immer mit Bedacht gehandelt werden sollte. Bei einer dauerhaften Beschädigung muss auf einen anderen Port umgeschaltet werden.

Weiterhin können die internen Schaltkreise bzw. elektronischen Bauteile einen Schaden aufweisen. Ausgelöst werden kann dies z.B. durch eine falsche Stromversorgung, ein Herunterfallen des Switches oder einen Fehler in der Produktionskette. Auch können Umweltbedingungen wie eine intolerante Betriebstemperatur oder eine zu hohe Luftfeuchtigkeit zu einem Schaden der internen Hardware führen. Beispielsweise können interne Hardwarekomponenten durch eine Überschreitung der maxi-

mal zulässigen Temperatur entlötet werden und den Switch zu einem Fehlverhalten zwingen.

Mögliche Fehler in der Software eines Switches stellen eine weitere Fehlerquelle dar. Hierbei können z.B. eine volle Auslastung, ein Paketverlust oder eine inkorrekte Paketzuführung auftreten [38]. Um diese Wahrscheinlichkeit möglichst gering zu halten, sollten Aktualisierungen der Firmware durchgeführt werden.

Durch die Verwendung eines VLANs, kann es bei der Konfiguration der Switches zu einer fehlerhaften Einstellung kommen. So sollten die Ports genau nach ihrem VLAN konfiguriert und auch die korrekte Verbindung dort positioniert werden.

Da es sich um eine Netzwerkkomponente handelt, können Angriffe von Hackern über DoS-Attacken oder Viren den Betrieb stören. Aus diesem Grund sieht das Konzept eine Firewall vor, welche das interne Netzwerk schützt. Weiterhin kann sich ein potentieller Angreifer direkt über den Schaltschrank und einem offenen Port Zugriff in das Netzwerk verschaffen. Um dies einzudämmen, werden alle nicht verwendeten Ports durch die Einstellungen der Switches ausgeschaltet. Jedoch kann ein Angreifer das Kabel an einem bereits verwendeten Port durch sein eigenes Kabel austauschen. Dagegen hilft die Verwendung von *Media Access Control* (MAC)-Adressen basierten Zulassungen, sodass nur die im Switch angegebenen Geräte mit ihren MAC-Adressen darauf zugreifen können. Weiterhin werden die außen montierten RJ45- und SFP-Anschlüsse durch den Switch schaltbar gemacht und bei einem verbundenen Gerät deren MAC-Adresse in die Zugriffsliste eingetragen. Um ein MAC- oder IP-Spoofing eines Angreifers zu erschweren, sollte eine IP-MAC-Bindung eingestellt werden [39]. Hierbei wird die angegebene MAC-Adresse nur in Verbindung mit einer bestimmten statischen IP-Adresse einem Zugriff gewährt. Bei einem Spoofing handelt es sich um das Imitieren von bestimmten Eigenschaften eines anderen Gerätes, um die eigene Identität zu verschleiern.

Als wichtigste Maßnahme gegen einen Angriff von außen müssen die Standard-Passwörter zum Einstellen der Switches ausgetauscht werden. Solche Angriffe wurden in der Vergangenheit bei Sicherheitsprüfungen als bedeutende Fehlerquelle identifiziert [29]. Darüber hinaus wäre es für einen Angreifer möglich durch einen Hard-Reset direkt an den Switches die Standard-Passwörter wieder herzustellen. Allgemein gilt dies auch für Passwörter anderer am Netzwerk teilnehmender Geräte. Dabei muss eine sichere Aufbewahrung der neu eingestellten Passwörter sicherge-

stellt werden. Frei zugängliche Passwörter sollten hierbei unbedingt vermieden werden, wie es ein Schriftstück im Schaltschrank darstellen würde.

Manche Switches bieten die Möglichkeit einer Aufzeichnung von System Events, welche z.B. ein fehlgeschlagener Authentifizierungsversuch oder Port Looping sein können [43]. Diese Events können über eine E-Mail direkt an den Administrator weitergeleitet oder über ein Logging auf dem Switch eingesehen werden.

Fällt der Internet-Switch aus, so wird nur die Kommunikationsmöglichkeit von außerhalb blockiert und die restlichen Systeme können ungestört weiterarbeiten. Bei einem Ausfall des Zentral-Switches hingegen ist nicht nur die Kommunikationsmöglichkeit von außerhalb gestört, sondern auch die Verteilung der Zeitinformationen des NTP-Servers. Eine Erläuterung dazu findet sich in Kapitel 5.1.4. Bei beiden Ausfällen arbeitet die Messtechnik weiter und zeichnet alle Daten auf.

Fällt der imc-Switch aus, setzt die Datenerfassung des USA über Ethernet aus. Dabei ist jedoch eine Redundanz der wichtigsten vier Messwerte in Form eines analogen Signals vorhanden. Auch die Steuerung der Relais über den WAGO PFC100-Controller wäre dadurch nicht mehr möglich. Bei der Programmierung des Controllers wird auf eine Implementierung eines Watchdog-Timers geachtet, der die Kommunikation zwischen dem Controller und dem Steuer-PC regelmäßig überprüft. Dabei soll der PFC100-Controller automatisch einen Ausfall detektieren und das Relais des imc-Switches schalten, damit dieser neustartet. Ein Neustart der anderen zwei Switches wird nicht in Betracht gezogen, da deren Stromversorgung nicht über ein Relais schaltbar sind. Jedoch ist für diesen Lösungsansatz ein größeres Know-How mit dem PFC100-Controller erforderlich. Zugleich müssen unterschiedliche Umsetzungsvarianten bewertet werden. Auch fällt die Kommunikation zum Messsystem und Steuer-PC aus, sodass die Messwerte nur intern auf dem Messsystem zwischengespeichert werden können.

5.1.4 NTP-Server

Der NTP-Server erhält mittels GNSS Zeitinformationen und verteilt diese über das Netzwerk an Geräte wie das USA oder den Steuer-PC. Ein Ausfall kann unterschiedliche Ursachen haben, wie die Änderung der IP-Adresse des NTP-Servers, beschädigte Hardwarekomponenten oder eine zu geringe Anzahl an sichtbaren GNSS-Satelliten.

Meinberg stellte einen ausführlichen Testbericht mit einzelnen Subkomponenten und deren Bauteilen auf Anfrage zur Verfügung. Darin werden Bauteile wie beispielsweise Widerstände, Kondensatoren, Halbleiter oder auch Schaltkreise untersucht und bewertet. Aufgelistet werden die folgenden Komponenten für den NTP-Server des Modells „LANTIME M100“ (siehe Tab. 5.1).

Komponente / Gerät	MTBF [h]	Ausfallwahrscheinlichkeit pro Stunde
LANTIME M100	328.336	$3,05 \cdot 10^{-6}$
Central Processing Unit (CPU)	402.684	$2,48 \cdot 10^{-6}$
GPS Receiver	2.366.754	$4,23 \cdot 10^{-7}$
Backplane PCB	92.356.180	$1,08 \cdot 10^{-8}$
Power Supply PCB	5.220.290	$1,92 \cdot 10^{-7}$

Tab. 5.1: MTBF und Ausfallwahrscheinlichkeiten zu Komponenten des NTP-Servers [40]

Eine einfachere Interpretation erhält man bei einer Umrechnung der MTBF in Jahre, wobei der LANTIME M100 eine mittlere Zeit zwischen zwei Reparaturen von ca. 37,5 Jahren aufweist.

Weiterhin kann das Signal der Satelliten gestört empfangen werden. Dabei kann es zu Interferenzen durch einen anderen Sender auf der Empfangsfrequenz kommen, da das GNSS Signal nur eine geringe Leistung aufweist. Dagegen können mehrere Frequenzbänder oder Satellitenkonstellationen verwendet werden. So weist das US-amerikanische *Global Positioning System* (GPS) fünf solcher Frequenzen auf [41]. Des Weiteren kann ein Abblocken des Signals durch Hindernisse wie Gebäude oder Bäume zustande kommen, sodass die für eine erfolgreiche Zeitübermittlung erforderlichen Satelliten nicht „sichtbar“ sind. Beide Fehlertypen sind jedoch als sehr niedrig einzustufen, da sich die Antenne auf dem Messmasten in einer freien und unbewohnten Fläche befindet.

Als weitere Fehlerquelle können sich die Satelliten erweisen, welche die Zeitinformationen über interne Atomuhren und Algorithmen zur Signalverzögerung sehr präzise versenden. So kam es 2016 zu einem kurzzeitigen Ausfall des US-amerikanischen GPS und 2019 zu einem mehrtägigen Ausfall des europäischen GALILEO Positionsermittlungsdienstes. Auch während dem Betrieb der übrigen drei

GNSS (Beidou, GLONASS und QZSS) sind in der Vergangenheit kurzzeitige Ausfälle zustande gekommen [42].

Ein Ausfall der Satellitenverbindung kann jedoch als nicht kritisch bewertet werden, da der NTP-Server einen *Temperature Compensated Crystal Oscillator* (TCXO) oder Oven Controlled Crystal Oscillator (OCXO) aufweist. Ein TCXO von Meinberg zeichnet sich mit einer Langzeitstabilität von $\pm 4,3$ ms über einen Tag aus, wohingegen ein OCXO eine bessere Langzeitstabilität von ± 865 μ s bis $\pm 4,5$ μ s über einen Tag aufweist und somit alle Geräte weiterhin mit einer Zeitinformation versorgt werden [44]. Genauso verhält es sich auch im Falle eines Blitzeinschlages in die GNSS-Antenne, wobei die Kabelverbindung über einen Überspannungsschutz geführt wird und somit der NTP-Server geschützt wird.

Ein Komplettausfall des NTP-Servers ist ebenfalls als nicht kritisch einzustufen, da die Uhren bzw. Quarze der zu synchronisierenden Geräte auch eigenständig weiterlaufen. Jedoch wird sich durch Qualitätsunterschiede der Quarze eine variable Zeitdrift einstellen. Somit wird die Genauigkeit beeinflusst und ein unterschiedlich stark kumulierender Zeitfehler tritt auf. Dies lässt einen Vergleich von Messwerten der Sensoren des gesamten Schaltschranks nur bedingt zu.

Des Weiteren kann über einen Web-Server auf den NTP-Server über das Netzwerk zugegriffen werden. Dort können verschiedene Einstellungen durchgeführt und Informationen abgerufen werden. So können Fehlermeldungen über eine E-Mail versendet und ein genauer Statusbericht des Fehlers über das Web-Interface eingesehen werden.

5.1.5 Kühlgeräte und Heizungen

Die Kühlgeräte besitzen einzelne Komponenten, welche für einen korrekten Betrieb und damit die Kühlung des Schaltschranks essentiell sind. Aufgelistet ergeben sich die folgenden Komponenten:

- Controller – Thermostat
- Verdichter
- Controller – Pressostat
- Verflüssigerventilator
- Thermostatisches Expansionsventil
- Verdampfer

- Verdampferventilator
- Luftfilter

Sobald eine dieser Komponenten ausfällt oder ein fehlerhaftes Verhalten aufzeigt, kann sich dies negativ auf die Funktion des Kühlgeräts auswirken. Ein Fehlverhalten des Verdichters kann beispielsweise durch zu wenig Kühlmittel oder einen zu geringen Gasdruck entstehen und zu einem Verlust an produzierter Kaltluft führen.

Für eine Wartung muss der Luftfilter des äußeren Kreislaufs in Betracht gezogen werden, da der innere Kreislauf durch den Schaltschrank geschützt wird. Der Filter dient der Reinigung der außerhalb des Schaltschranks angesaugten Luft von Ölpartikeln. Daher besitzt dieser Filter keine eindeutige Klassifizierung nach DIN EN 779. Jedoch folgte nach einer Anfrage an den Hersteller durch diesen die Auskunft, dass der Filter eine Güteklasse zwischen G2 und G3 aufweist. Hierbei werden die Klassen folgendermaßen beschrieben [45]:

- **G1 / G2:** Filterung für einfache Anwendungen wie z.B. von Insekten
- **G3:** Filter für die Anwendungsgebiete eines Vor- und Umluftfilters für Zivilschutzanlagen oder der Abluft von Farbspritzkabinen und Küchenabluft

Zusammengefasst werden Partikel ab einer Größe von 10 µm wie Textilfasern, Sand, Flugasche oder auch Blütenstaub und Pollen aus der Luft gefiltert. Insbesondere im landwirtschaftlichen Einsatzgebiet sollte auf die Staubentwicklung durch landwirtschaftliche Maschinen und Pestiziden geachtet werden. So sollte in einer Anfangsphase der Filter öfter inspiziert und demnach ein Reinigungsintervall festgelegt werden. Laut Herstellerangaben sollte dieser je nach Umweltbedingungen mindestens 1-mal jährlich ausgetauscht werden. Ein zweiter Metallfilter ist für die Reinigung des inneren Luftkreislaufs zuständig und besitzt dieselbe Eigenschaft, Partikel ab einer Größe von 10 µm herauszufiltern. Weil der Schaltschrank den inneren Kreislauf schützt (siehe Kapitel 5.1.12), ist dieser Metallfilter der Gefahr des Blütenstaubs nicht ausgesetzt und kann bei der Kontrolle des anderen Filters einer Sichtprüfung unterzogen werden.

Da die Kühlgeräte an der Schaltschrantür montiert werden und dementsprechend außerhalb vorherrschenden Umweltbedingungen ausgesetzt sind, wird ein gewisser Schutzgrad benötigt. Dabei wird eine Kombination aus den Schutzkategorien 3R, 4

und 12 der *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA)-Klassifizierung erreicht, welche folgendermaßen definiert sind [46]:

- **Typ 12:** Schutz in Innenräumen gegen feste Fremdkörper (größere Schmutzpartikel, zirkulierende Staubpartikel, Flusen, Fasern und fliegenden Objekten) und Wasser (Tropfen und Spritzwasser)
- **Typ 3R:** Schutz in Innen- und Außenräumen gegen feste Fremdkörper (größere Schmutzpartikel) und Wasser (Regen, Graupel und Schnee)
- **Typ 4:** Schutz in Innen- und Außenräumen gegen feste Fremdkörper (größere Schmutz- und Staubpartikel) und Wasser (Regen, Graupel, Schnee, Spritzwasser und einem direkten Wasserstrahl)

Der Hersteller Rittal stellte zu einzelnen Komponenten diverse Informationen bezüglich der MTBF bereit, die in Tab. 5.2 aufgelistet sind. Die restlichen Komponenten sollen je nach Verwendung ausgetauscht werden.

Komponente	MTBF	Ausfallwahrscheinlichkeit pro Stunde
Controller - Thermostat	87.600 h	$1,14 \cdot 10^{-5}$
	500.000 Schaltzyklen	
Controller - Pressostat	10.000 Schaltzyklen	—
Verdichter	87.600 h	$1,14 \cdot 10^{-5}$
Verflüssigerventilator	30°C: 63.000 h	$1,59 \cdot 10^{-5}$
	45°C: 55.000 h	$1,82 \cdot 10^{-5}$

Tab. 5.2: MTBF und Ausfallwahrscheinlichkeiten zu Komponenten der Kühlgeräte [47]

Als nicht essentiell ist die Netzwerktechnik zu betrachten, die aus zwei Buskabeln für eine Master-Slave-Steuerung, einem IoT-Adapter und IoT Interface mit jeweiligem Verbindungskabel besteht. Im Fall eines Fehlers der Hardware oder in der Übertragung werden lediglich die Befehlsausführung sowie das Abrufen der Statusinformationen beeinträchtigt.

Die Kühlgeräte liefern über die Anbindung an das Netzwerk verschiedene Systemmeldungen. So wird eine Temperatur außerhalb des zulässigen Betriebsbereichs gemeldet. Bei einer zu hohen Temperatur wird eine zu geringe Kühlleistung gemel-

det und bei einer zu niedrigen Temperatur droht eine Vereisungsgefahr, welche in einer detaillierteren Fehlermeldung verschickt wird. Weiterhin werden Fehler einzelner Komponenten wie des Druckwächters, Verdampfers oder Verflüssigers angezeigt. Die Anleitung der Kühlgeräte in [48] gibt dabei eine genaue Auskunft über die in diesem Fall auftretenden Fehlercodes und die durchzuführenden Maßnahmen für eine Fehlerbehebung.

Der Hersteller Rittal definiert ein Wartungsintervall von 2.000 Betriebsstunden des Gesamtsystems. Diese Angabe bezieht sich nur auf den äußeren Kühlungskreislauf, da der innere Kreislauf durch den Schaltschrank geschützt ist. Die Ventilatoren sind dabei gegen Feuchtigkeit und Staub abgedichtet. Das Wartungsintervall ist jedoch durch den Verschmutzungsgrad der Teile des äußeren Kreislaufs flexibel anpassungsfähig und hängt somit von den in der Umgebungsluft beinhaltenen Stoffen ab. Die Teile sollen dabei mit Druckluft oder einem Staubsauger gereinigt werden.

Bei den Heizungen stellt der Lüfter eine entscheidende Komponente dar, welcher für eine Verteilung der erwärmten Luft sorgt. Falls dieser ausfallen sollte, steigt die erwärmte Luft nach oben auf, da die Heizungen am Boden des Schaltschranks eingebaut werden. Dadurch wird die Wärmeverteilung eingeschränkt und es kann zu einer Unterkühlung von Geräten im Schaltschrank kommen. Weiterhin wird ein Thermostat zur Regelung der Temperatur benötigt, welches eine weitere Fehlerquelle darstellt und somit den Betrieb der Heizung einschränken kann. Das wichtigste Element ist jedoch das *Positive Temperature Coefficient* (PTC)-Heizelement, welches einen elektrischen Strom in Wärme umwandelt. Dieses kann z.B. durch einen zu geringen Luftstrom oder mit Staub verunreinigten Radiatoren zu einer dauerhaft hohen Auslastung gezwungen werden, sodass die Lebensdauer verringert wird. Die Heizung besitzt nach Herstellerangaben eine MTBF von 50.000 Stunden. Da der Schaltschrank einen sehr guten Schutz gegen Staub und Wasser bietet, sollten Verunreinigungen jeglicher Art bereits zu einem hohen Grad vermieden sein.

Fällt ein Klimagerät oder eine Heizung aus, so kann es zu einer Überhitzung bzw. Unterkühlung der Geräte kommen. Da der Schaltschrank der Sonneneinstrahlung ausgesetzt sein wird, können im Sommer sehr hohe Temperaturen erreicht werden. Dabei können einzelne Bauteile ausgelötet werden und so zu einem Fehler des Gerätes führen. Bei zu niedrigen Temperaturen hingegen sinkt die Fähigkeit der Luft,

Wasser aufzunehmen und es kann sich Kondensat auf einzelnen Bauteilen bilden. Dieses kann wiederum zu Kurzschlüssen führen.

5.1.6 Sensoren

Der IECplus-Mast umfasst eine Vielzahl an Sensoren, welche in Kapitel 2.2.1 erwähnt wurden. Da zum Erstellungszeitpunkt dieser Arbeit der Hersteller der Sensoren feststand, konnten genauere Aussagen zu dem Verhalten, den Fehlern und Ausfallwahrscheinlichkeiten getroffen werden.

5.1.6.1 Schalensternanemometer und Windfahne

Das Schalensternanemometer ist für die Erfassung der horizontalen Komponente der Windgeschwindigkeit zuständig.



Abb. 5.4: Schalensternanemometer mit einer abgebrochenen Schale [49]

Bei einer falschen bzw. schrägen Einbaulage des Anemometers wird die Ermittlung der Windkomponente beeinträchtigt und falsche Werte werden an das Messsystem gesendet [50]. Genauso verhält es sich für die Windfahne, bei welcher das dynamische und statische Verhalten durch eine schräge Einbaulage beeinflusst wird. Daher muss eine korrekte Montage von 90 Grad sichergestellt werden.

Beide Sensoren beinhalten einen drehbaren Körper, welcher mit einem Schaft und Kugellagern ausgerüstet ist. Diese sind besonders in korrosiven Umgebungen wie salzhaltiger Luft in Meeresnähe empfindlich oder können durch Staubpartikel in ihrer Dynamik beeinträchtigt werden. Besonders die Kugellager sind fehleranfällig. Um

diese Störkomponenten zu verhindern, werden hochwirksame Labyrinthdichtungen sowie O-Ringe verwendet und die äußeren Bauteile sind aus korrosionsbeständigem Aluminium gefertigt [51]. Dennoch kann eine Kombination von Wasser und kalten Temperaturen ein Einfrieren des Schafts verursachen. Dabei kann die Dynamik negativ beeinträchtigt werden und gegebenenfalls der Schaft komplett seine drehbare Eigenschaft verlieren. Für eine Kompensation dieses Fehlverhaltens wird eine Heizung in beiden Sensoren verwendet.

Der Hersteller der Geräte rät je nach Umweltbelastungen durch z.B. Staub eine turnusmäßige Wartung mit einem Reinigen des Schlitzes zwischen rotierenden und feststehenden Teilen durchzuführen.

5.1.6.2 Thermo-Hygrogeber

Der Thermo-Hygrogeber misst zum einen die Temperatur und zum anderen die Luftfeuchtigkeit. Für beide Messungen werden einzelne Sensoren benötigt, wobei dieser für die Luftfeuchtigkeit mehrere Besonderheiten aufweist. So sollte dieser keine zwölf Monate unter identischen klimatischen Bedingungen gelagert werden, da das Polymer des Sensors dadurch träge wird und die Messung sein dynamisches Verhalten verliert. Jedoch ist dieser Prozess reversibel und eine Anleitung für die Regeneration wird in [52] gegeben. Ab 90 % relativer Luftfeuchtigkeit stehen Ad- und Desorption von Wassermolekülen im Polymer und damit die dielektrischen Eigenschaften bzw. Messwerte in keinem linearen Verhältnis mehr, sondern steigen überproportional stark an [52]. Dies führt mit der Zeit bei hoher Feuchtigkeit zu einer überhöhten Messungenauigkeit. So kann der Sensorwert eine relative Luftfeuchtigkeit von über 100 % anzeigen, ohne dass ein Fehler des Sensors vorliegt.

Weiterhin kann sich Staub auf der Sensoroberfläche absetzen, der das dynamische Verhalten beeinträchtigt. Daher ist ein regelmäßiges Reinigen mit destilliertem Wasser je nach Umweltbedingung notwendig. Für einen besseren Schutz gegen Staub, Sand und hohen Windgeschwindigkeiten über 5 m/s kann ein Sinterfilter an die Sensorelemente befestigt werden [52]. Dieser sollte jährlich gereinigt werden.

Allgemein sollten beide Sensoren vor eindringendem Wasser geschützt sein, indem der richtige Montagewinkel gewählt wird. Betauung oder Spritzwasser schaden den Sensoren nicht, führen jedoch zu einem kurzfristigen Fehlverhalten des Luftfeuchtigkeitssensors bis zu einem restlosen Abtrocknen.

Der Temperatursensor sollte für eine korrekte Messung vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt sein und damit der komplette Sensor in einem sonnenlichtgeschützten Gebiet montiert werden. Falls dies nicht möglich ist, wird ein Wetter- und Strahlungsschutz empfohlen [52]. Dieser minimiert das Risiko für ein Fehlverhalten durch Witterung, Strahlung oder einer Beschädigung. Jedoch kann es dabei zu abweichenden klimatischen Bedingungen unter dem Schutz kommen, sodass dadurch falsche Messungen zustande kommen. Gegen diesen Effekt besitzt der Schutz ein eigenes Belüftungssystem, welches wiederum ausfallen könnte.

Ein Wartungsintervall des Herstellers wird nicht angegeben, da je nach Veränderung des dynamischen Verhaltens des Feuchtigkeitssensors durch Staubablagerungen dieser abgeblasen oder mit destilliertem Wasser gereinigt werden sollte. Daher sollte bei einer Wartung der anderen Sensoren der Thermo-Hygrogeber begutachtet und gereinigt werden.

5.1.6.3 Barometer

Das Barometer dient zur Ermittlung des Luftdrucks und muss je nach Höhe mit einem Offset betrieben werden [53]. Zudem sollte das Barometer nicht in Wasser und aggressiven oder leitenden Gasen verwendet werden [53]. Hierbei könnte salzhaltige Luft zu einer langsamen Korrosion führen. Für eine korrekte Messung muss die Richtung der Montage beachtet werden. Falls es dennoch zu einer Kombination aus Wasser und niedrigen Temperaturen kommen sollte, welche den Sensor beeinträchtigen kann, wird das Barometer mit einer Heizung betrieben. Dabei ist aus dem Datenblatt [53] ersichtlich, dass die Messungengenauigkeit mit dem Betrieb der Heizung abnimmt, da der piezoresistive Sensor eine temperaturabhängige Sensitivität besitzt. Diese wird mit der Erhöhung der Temperatur geringer [54].

Da das Barometer zusätzlich zu dem analogen Signal über eine RS485-Schnittstelle verfügt, können Statusinformationen übertragen werden. So werden allgemeine Fehlfunktionen, der Status und die Kontrolle der Heizung sowie eine überhöhte Temperatur gemeldet.

Laut Hersteller ist das Barometer wartungsfrei. Dennoch kann bei einer Kontrolle der anderen Sensoren zusätzlich eine Sichtprüfung erfolgen.

5.1.6.4 Niederschlagssensor

Der Niederschlagssensor misst die Menge an Niederschlag wie Regen, Schnee oder Hagel. Eine falsche Montage führt zu einer Verkleinerung der Öffnung, durch welche der Niederschlag hindurch fällt, und verfälscht auf diese Weise die Messergebnisse.



Abb. 5.5: Niederschlagssensor des Unternehmens Thies [55]

Über Dioden wird ein pulsierendes Licht erzeugt, welches durch einen Niederschlag absorbiert wird und auf dem gegenüberliegenden Lichtsensor nicht ankommt [55]. Sollte dieser Bereich stark verschmutzt oder mit Eis besetzt sein, so kommen fehlerhafte Messergebnisse zustande. Zur Vermeidung dieser Fehlerquellen wird eine Heizung verwendet und in einer turnusmäßigen Wartung ein Abwischen mit einem feuchten Tuch empfohlen.

Weitere Fehlerquelle stellen Vibrationen und Schockbelastungen dar, welche jedoch auf dem Messmasten nicht vorkommen sollten. Einfache Schwankungen des Mastes beeinträchtigen das Messergebnis nur sehr gering.

Da der Lichtsensor die Abschattung durch Objekte jeder Art registriert, führen Pollen, Blätter und Staubteilchen zu fehlerhaften Messergebnissen. Die Höhe des Niederschlagssensors auf dem Messmasten beträgt 10 m, sodass dies regelmäßig vorkommen kann. Pollen mit ihren Größen bis 250 μm erreichen nach [56] mehr als 1000 m über dem Grund an Höhe. Genauso erreicht der Staub, welcher beispielsweise durch das Vorbeifahren des Landwirts aufgewirbelt wird, den Sensor. Beide Teilchenarten sind jedoch sehr klein in ihrem Durchmesser und die Dichte nimmt mit der Höhe ab. Somit wird der Einfluss nur bei einem direkten Vorbeifahren des Landwirts messbar sein.

Eine Wartung ist laut Thies nicht notwendig. Jedoch kann bei einer Kontrolle der anderen Sensoren der Niederschlagssensor mit einem feuchten Tuch gereinigt wer-

den. Dabei gilt zu beachten, dass der vordere Bereich mit einer besonderen Beschichtung versehen ist und daher ein starkes Reiben vermieden werden muss.

5.1.6.5 Ultraschallanemometer

Das USA ist der komplexeste Sensor und misst die Windgeschwindigkeiten in drei Achsenrichtungen sowie die akustische Temperatur und stellt weitere Parameter zur Verfügung. Dabei wird über sechs Ultraschallsonden die zeitliche Variation des ausgegebenen Schalls gemessen und in die entsprechenden Parameter umgerechnet (siehe Abb. 5.6). Sobald einer der Sonden durch ein Objekt blockiert wird, sodass der Schall von den anderen Sensoren nicht mehr erfasst werden kann, ist die Berechnung einer Windkomponente nicht mehr möglich. Der Wert dieser Komponente wird durch die Software auf eine sehr hohe Zahl eingestellt und ein Fehler ist ersichtlich. Über ein Statuswort oder einer direkten Abfrage durch ein Kommandozeilen-Interface werden über die Ethernet-Schnittstelle beispielsweise Informationen der fehlerhaften Sonden übertragen.



Abb. 5.6: Ultraschallanemometer uSonic-3 Cage MP des Unternehmens Metek [23]

Eine Vereisung der Sonden stellt eine Art der Blockade für den Schall dar. Daher werden diese mittels Heizungen über die Gefriertemperatur von Wasser erhitzt und dieses Szenario verhindert. Sollte jedoch eine Heizung ausfallen, so sollte besonders im Winter sofort reagiert werden.

Weiterhin bietet das USA die Möglichkeit, einen Offset der analogen Schnittstellen einzustellen. Dabei kann bei einer Fehleranalyse zwischen einem System- oder Kabelfehler und einer Messung außerhalb des gültigen Bereichs unterschieden werden. Die Werte OD und OI zeigen einen Fehler der Sensoren und Wege an [23]. Weiterhin werden dieser Fehler und eine defekte Heizung über ein Statuswort angezeigt, so dass mittels der selbstgeschriebenen Software eine Benachrichtigung über die Messsoftware ausgegeben wird.

Vögel stellen eine weitere Gefahr dar. Da es sich jedoch um ein 3-dimensionales USA handelt, setzen sich Vögel zumeist auf den oberen Teil des Anemometers, was nur eine geringe Beeinflussung der Messwerte durch eine Bewegung zur Folge hat. Ein Hineinsetzen zwischen die Sensorköpfe kommt nur sehr selten vor und verfälscht die Messwerte für die Zeit des Sitzens. Jedoch könnte der Vogel seinen Kot auf einen der Sensoren niederlassen, womit es zu einem Ausfall einer Windkomponente kommt. Laut Metek ist dies nur sehr selten vorgekommen und mit einem Regenschauer gereinigt worden. Bei trockenem Wetter und einem Ausfall eines Sensorkopfes sollte eine Sichtprüfung erfolgen.

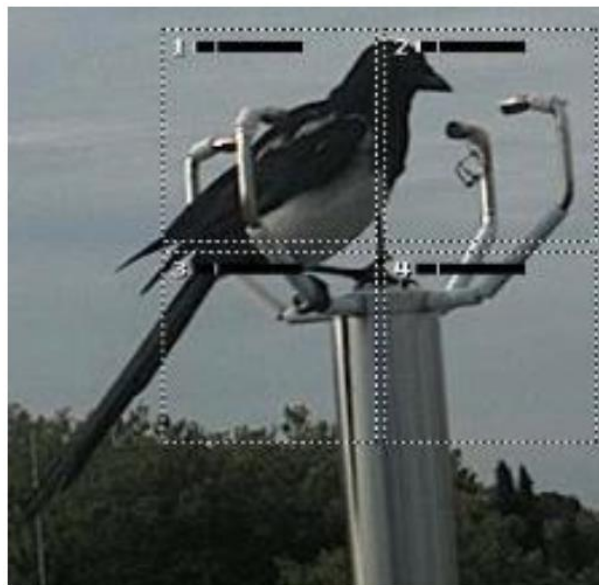


Abb. 5.7: Vogel auf einem 2D-Ultraschallanemometer [57]

2-dimensionale USA haben laut des Deutschen Wetterdienstes häufiger Probleme mit Vögeln, weil diese sich direkt zwischen die Sensoren setzen und diese teilweise direkt angreifen (siehe Abb. 5.7 und Abb. 5.8). So waren Vögel für mehr als 50 % aller Fehler eines 2D USA in den Jahren 2010 bis 2013 verantwortlich [57]. Jedoch sind nach Rückfragen an den Hersteller Metek keine vermehrten Ereignisse mit Vögeln vorgekommen, sodass dieser Fehlerfall als niedrig eingestuft wird. Im Fall eines wiederkehrenden Vogels bietet Metek eine Hilfestellung mittels eines Gestänges über dem Anemometer an.



Abb. 5.8: Beschädigte Sensormembran (links) und herausgezupfte Sonotrode (rechts) [57]

Allgemein können sich Staub, Salz oder Wasser auf den Sensorköpfen absetzen. Diese beeinflussen die Ultraschallwege gleichermaßen und führen zu keinem Fehler, solange bis das Signal zu stark gedämpft wird. Der Wert der akustischen Temperatur kann jedoch durch Ablagerungen ca. 1-2° K von der tatsächlichen Temperatur abweichen [58]. Diese Verschmutzungen sollten mit einem Regenschauer bereinigt werden und zu keinen Fehlern führen.

Das USA ist laut Metek wartungsfrei und eine MTBF von 657.000 Stunden ist nach Fehlerberichten erstellt worden. Das Unternehmen weist deutlich darauf hin, dass dieser Wert unrealistisch groß ist und gibt eine offizielle MTBF von 50.000 Betriebsstunden an. Eine genauere Analyse der Aussagekraft von MTBF Werten wird in Kapitel 5.2.4 durchgeführt. Manche Systeme des Herstellers sind schon seit über 15 Jahren fehlerfrei in Betrieb. Die bisherigen Fehler des USA können in folgende Kategorien eingeteilt werden:

- Bedienung,
- Überspannung,
- Umwelt,
- Bauteil,
- Fertigung und
- Design.

Dabei kann keine eindeutige Fehlerursache ermittelt werden, da die Kategorien in etwa in gleichen Prozentsätzen auftreten.

5.1.6.6 Sensoren im Allgemeinen

Gewissermaßen gilt für alle Sensoren, dass sie nur in den im Datenblatt angegebenen Temperaturbereichen betrieben werden sollten. Bei sehr kalten Temperaturen und der Verwendung im Winter bieten alle Sensoren bis auf das Thermo-Hygrometer eine Heizung.

Jeder Sensor wird durch den Hersteller kalibriert geliefert, wobei eine falsche Kalibrierung zu falschen Messergebnissen führen würde. Dabei ist laut Hersteller nur eine einzelne Kalibrierung notwendig.

Die Hardwarekomponenten unterliegen einer gewissen Ausfallwahrscheinlichkeit, wobei die einzelnen Sensorelemente, Schaltkreise für die Verarbeitung der Daten und die Schnittstellen darunter fallen. Die einzelnen Schnittstellen werden jedoch genauer und gesondert in Kapitel 5.1.11 betrachtet. Nach einer Anfrage an den Hersteller Thies wurde empfohlen, alle Sensoren jährlich zu überprüfen und nach wenigen Jahren des Betriebs die Kugellager der Schalensternanemometer austauschen zu lassen.

Besonders bei der Montage aller Sensoren muss für eine korrekte Messung auf den Einbauwinkel geachtet werden. Zudem müssen die elektrischen Verbindungen richtig angebunden werden.

Da der Messmast ein freistehendes hohes Objekt auf einem Feld darstellt und die elektrische Feldstärke an spitzen Gegenständen erhöht ist, kann sich bei einem Gewitter der Plasmakanal des Blitzes dort sehr gut ausbilden. Um jedoch einen Blitz von den Sensoren abzuhalten und von diesen entfernt abzuleiten, werden Blitzfangstangen an jedem Ausleger auf jeder Höhe montiert und am Grund des Mastes geerdet. Jedoch bieten diese Blitzfangstangen nur einen schirmartigen Schutz von ca. 60° zu allen Seiten, sodass dennoch eine geringe Gefahr eines direkten Blitzeinschlages an einem Sensor besteht [50]. Jedoch trifft dieser Fehlerfall nach dem Unternehmen Thies, welches alle Sensoren bis auf das USA liefert, nur sehr selten auf.

Bei einem Sturm kann es zu herumwirbelnden Gegenständen kommen, welche mit einer großen Geschwindigkeit und damit einer hohen kinetischen Energie auf die Sensoren auftreffen und diese beschädigen können. Diese Gefahr besteht jedoch

nur im unteren Bereich des Messmasten, da mit zunehmender Höhe das maximale Gewicht des Fremdobjektes abnimmt.

Vögel stellen hingegen auch eine Gefahr für den gesamten Bereich des Messmasts dar. So können sie die Sensoren blockieren, darauf nisten oder ihre Fäkalien hinterlassen. Beide Sensorhersteller stufen einen Fehler, welcher durch einen Vogel verursacht wurde, als unwahrscheinlich ein.

Die folgende Tabelle zeigt die MTBF bzw. Ausfallwahrscheinlichkeiten aller Sensoren.

Sensor	MTBF [h]	Ausfallwahrscheinlichkeit pro Stunde
Schalensternanemometer	95.000	$1,05 \cdot 10^{-5}$
Windfahne	95.000	$1,05 \cdot 10^{-5}$
Barometer	85.000	$1,18 \cdot 10^{-5}$
Thermo-Hygrogeber	120.000	$0,83 \cdot 10^{-5}$
Niederschlagswächter	87.000	$1,15 \cdot 10^{-5}$
USA	50.000	$2,00 \cdot 10^{-5}$

Tab. 5.3: MTBF und Ausfallwahrscheinlichkeiten der Sensoren

5.1.7 Steuer-PC

Der Steuer-PC ist für die Steuerung aller dort angeschlossenen Überwachungsgeräte und der Messanlage sowie für die Speicherung der Messdaten zuständig. Daher muss dieser eine ausreichend große Fehlertoleranz gegen Datenverlust und einen Ausfall besitzen. Dabei spielen seine einzelnen Komponenten und deren Auswahl eine wichtige Rolle, welche hier einzeln auf ihre Fehlerquellen diskutiert und analysiert werden. Generell gilt, dass die in diesem Kapitel diskutierten Fehler auch auf andere Komponenten des Schaltschranks übertragen werden können, da diese auch Bauteile wie eine CPU oder ein Speichermedium enthalten. Weil viele Literaturquellen den Schwerpunkt Speichermedium aufgreifen, wurden diese für einen Vergleich der zwei meist verwendeten Speichermedien genutzt und eine detaillierte Analyse der Fehlerquellen durchgeführt.

5.1.7.1 Speichermedien

Bei einem Speichermedium muss zwischen einer *Hard Disk Drive* (HDD) und *Solid State Drive* (SSD) unterschieden werden. Eine HDD beinhaltet mechanische Komponenten wie eine rotierende Scheibe oder einen Schreib-Lese-Kopf. Um beispielsweise eine Beschädigung bei einem Fall zu verhindern, wird dieser über Beschleunigungssensoren erkannt und der Tastkopf in einen sicheren Zustand gefahren.

Dadurch, dass die Benutzer nur selten Fehlerursachen melden, ist die durch den Hersteller angegebene MTTF einer HDD oftmals nicht aussagekräftig und die Methoden bzw. Genauigkeit zur Ermittlung dieser wird angezweifelt [59]. Dazu trägt der Fakt bei, dass eine Fehlerursache einer HDD durch komplexe Vorgänge ausgelöst wird. So können Fehler latent oder transient auftreten oder durch eine Fehlproduktion und ein Softwareupdate ausgelöst worden sein. Selbst die Art der Produktionsanlage beeinflusst die MTTF [59]. Dies wird als „effect on batches or vintage“ (Effekt von Chargen oder des Jahrgangs) bezeichnet. Gute HDDs besitzen laut Hersteller eine MTTF von 1.000.000 bis 1.500.000 Stunden, wobei eine jährliche Ausfallrate von 0,58 bis 0,88 % zustande kommt. In [59] wurde jedoch die *Annual Replacement Rate* (ARR) in der Industrie bei mehreren *High Performance Computing* (HPC)-Systemen im großen Stil untersucht. Frühere, kleinere Studien wie [60], [61] oder [62] machen teilweise dieselben Ergebnisse ausfindig und weisen einen vergleichbaren Wert der ARR auf.

Bei dem Austauschkriterium jedes beobachteten HPC-Systems muss berücksichtigt werden, dass unterschiedliche Testalgorithmen mit unterschiedlich geforderten Antwortzeiten an den HDDs durchgeführt werden. Nominell lag die ARR bei ca. 3 %, stieg jedoch bis zu einem Maximum von 24 % an. Zustande kommt dieser große Unterschied durch einen Alterungseffekt. Je älter eine HDD wird, desto höher wird dessen Ausfallrate bzw. ARR. Für diesen Effekt wird Abb. 3.2 herangezogen und eine ungefähre Zeitangabe hinzugefügt (siehe Abb. 5.9).

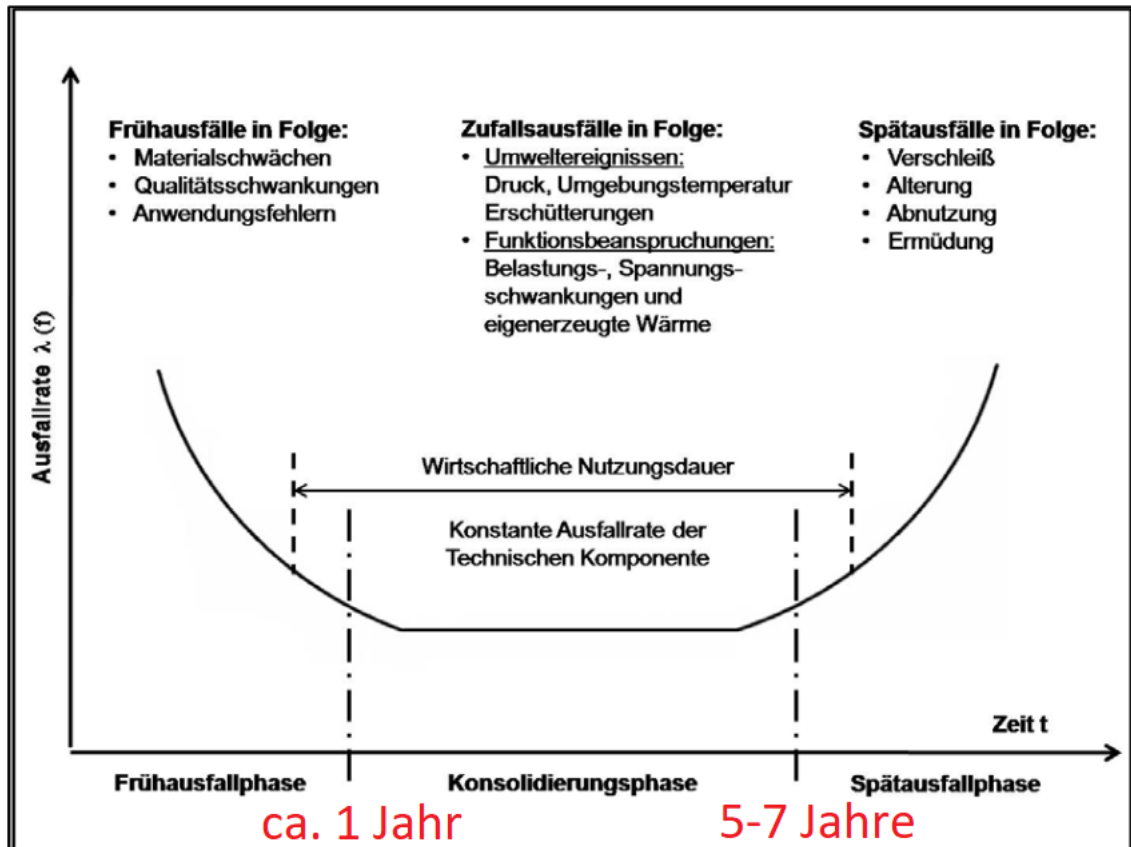


Abb. 5.9: Lebenszyklusfehler für HDDs [59]

Widererwartend dieser Abbildung wiesen sehr neue HDDs mit einem Alter von unter einem Jahr eine ARR von 0,5 % auf, welche sogar unter der vom Hersteller angegebenen MTTF liegt (siehe Abb. 5.10). Dies kann über eine Aussortierung der Hersteller von Frühausfällen zustande kommen, da in dieser Literaturquelle nur die Kundenseite berücksichtigt wurde. Weiterhin steigt die ARR kontinuierlich mit dem Alter einer HDD und bildet kein Plateau aus, wie es in Abb. 5.10 für ein bestimmtes HPC-System zu erkennen ist. [59]

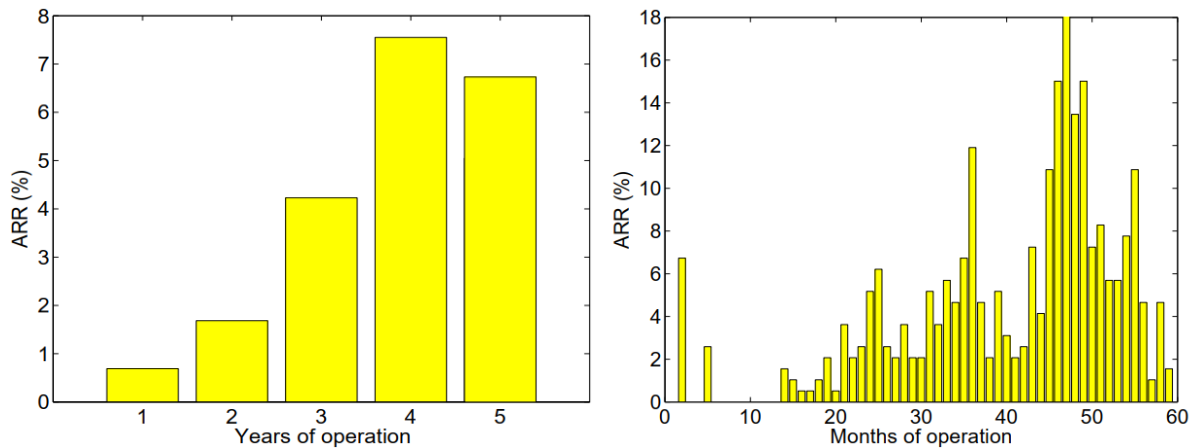


Abb. 5.10: ARR von HDDs eines bestimmten HPC-Systems (HPC1) in Jahren (links) und Monaten (rechts) [59]

Eine Erklärung der großen Abweichungen der ARR gegenüber der MTTF können unterschiedliche Definitionen darstellen, wann eine HDD durch den Hersteller und den Benutzer als fehlerhaft angesehen wird. Weiterhin werden Herstellertests über eine beschleunigte Alterung und nicht unter realen Bedingungen getestet sowie keine kontinuierlich größer werdende Ausfallrate berücksichtigt. [59]

Die verschiedenen Anschlusstechniken der HDDs (SATA, SCSI, FC) an das Motherboard wiesen nach [59] nur einen geringen Unterschied in ihrer ARR auf und widerlegen die allgemeine Aussage, dass SATA eine höhere Ausfallrate besitzt.

Bei einer SSD muss wiederum zwischen *Single Level Cells* (SLC), *Multi Level Cells* (MLC), *Triple Level Cells* (TLC) und *Quadruple Level Cells* (QLC) unterschieden werden. Dabei geht es um die Bitanzahl, die pro Speicherzelle belegt werden kann. Dies wird über verschiedene Spannungspegel einzelner Floating-Gate-Transistoren realisiert. Umso größer die Anzahl dieser Pegel ist, desto genauer muss der Transistor arbeiten und desto fehleranfälliger ist dieser ([63], [64]). Wichtig ist auch die Anzahl der Zugriffe auf eine Speicherzelle. In der Theorie erreicht eine TLC ungefähr 3000 bis 5000 Lese- und Schreibe-Zyklen, wohingegen eine SLC 90.000 bis 100.000 Lese- und Schreibe-Zyklen erreicht [65]. Jedoch muss dies in Relation zu der Speichergröße gesehen werden, welche für eine TLC mit drei Bit bei acht Werten und bei einer SLC mit einem Bit bei einem Wert liegt. Dadurch besitzt eine TLC eine theoretische Lebenserwartung von ca. 40 % gegenüber einer SLC. Damit alle Transistoren gleichermaßen verwendet werden, wird eine „Wear-Leveling-Technique“ eingesetzt und so die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall minimiert. Wenn eine einzelne Zelle dennoch im Voraus ein fehlerhaftes Verhalten aufweisen

sollte, so wird ein „Bad Block Management“ angewandt und die Daten der defekten Zelle in eine funktionierende Zelle geschrieben [66]. Weiterhin wird die Lebensdauer einer SSD erhöht, indem mit Hilfe eines „Garbage Collection“ Algorithmus nicht mehr benötigte Speicherzellen gelöscht und neu beschrieben werden können. Eine Lebenszeit wird meistens in *Total Bytes Written* (TBW) oder *Drive Writes per Day* (DWPD) angegeben. Die TBW geben die maximal zu schreibende Datenmenge an, wohingegen die DWPD die Anzahl an Schreibvorgängen pro Tag darstellt. Beide Werte sind Lebenszeitangaben des Herstellers, welche jedoch auch übertroffen werden können. Ein weiterer Faktor für eine erhöhte Fehleranfälligkeit einer SSD stellt nach [67] die Betriebsdauer bzw. Lösch- und Schreibrate dar. So steigt die *Raw Bit Error Rate* (RBER) eines Transistors mit der Anzahl an Lösch- und Schreibvorgängen. Jedoch führt eine hohe RBER nicht zwingend zu irreparablen Fehlern. Weiterhin wird in [67] auch die höhere Zuverlässigkeit von SLC zu MLC widerlegt, da die Ausfallraten der in dem Rechenzentrum über sechs Jahre beobachteten SSDs bei beiden Systemen ungefähr gleich ausgefallen sind. Genauso streut die Austauschrate der SSDs je nach Modell über ihre ersten vier Lebensjahre zwischen vier bis zehn Prozent.

Somit kann die Aussage getroffen werden, dass SSDs gegenüber HDDs unter realen Bedingungen in Hinblick auf ihre ARR zuverlässiger sind. Jedoch hinsichtlich ihrer Rate an Fehlern sind HDDs wiederum besser. Diese gegensätzliche Argumentation kommt durch die Fehlertoleranz der SSDs zustande, da diese viele Fehler durch implementierte Algorithmen wieder korrigieren oder umgehen können. Auch bedeutet ein nicht korrigierbarer Fehler nicht den sofortigen Ausfall des gesamten Speichermediums, da dies auch nur einzelne Transistoren betreffen kann, wie es bei einem „Bad Block“ der Fall ist. Dennoch sind die oben angegebenen Zahlenwerte beider Speichermedien mit Einschränkungen verbunden. So hängt jede Fehlerrate auch mit der Benutzung und Alterung des Speichermediums zusammen und ein privater Einzelverbraucher oder auch der Steuer-PC für dieses Projekt werden Unterschiede dazu aufweisen.

Generell können beide Speichermedien durch Umweltbedingungen wie einer zu hohen Temperatur (Entlöten der Hardware) oder zu hohen Luftfeuchtigkeit (Korrosion von Metallen) einen Fehler aufweisen.

Um einen Datenverlust durch einen kompletten Ausfall des Speichermediums zu verhindern, kann ein *Redundant Array of Independent Disks* (RAID) verwendet werden. Die RIADs unterscheiden sich in ihrer Funktion, welche mit einem Zahlenwert wie z.B. RAID0 oder RAID1 gekennzeichnet sind [68]. Ab einem RAID1 werden zwei oder mehr Speichermedien parallel mit denselben Daten beschrieben, sodass dort immer eine Redundanz aller Daten vorhanden ist. Wichtig für den Steuer-PC im Schaltschrank ist, eine „heiße“ Redundanz zu wählen. Somit kann ein weiterlaufender Betrieb während eines Austausches eines Speichermediums gewährleistet werden und die Messdaten gehen nicht für die Zeit des Austausches verloren.

Weiterhin sollte ein regelmäßiges Backup der Daten durchgeführt werden, da diese nicht nur durch einen Fehler des Speichermediums verloren gehen können. So sind nach [69] die häufigsten Gründe:

- ein unbeabsichtigtes oder beabsichtigtes Überschreiben oder Löschen von Dateien ausgelöst durch einen menschlichen Fehler oder eine schädliche Software,
- die Anwesenheit eines Virus oder sonstiger Malware,
- ein fehlerhaftes Verhalten des Betriebssystems oder anderer Software,
- fehlgeschlagene Soft- oder Hardwareupgrades,
- ein Stromausfall,
- ein unübliches Verhalten der Hardware durch Überhitzung oder eine elektrostatische Entladung und
- ein physischer Schaden des Speichermediums.

Daher werden in regelmäßigen Abständen die Messdaten mittels eines USB-Speichermediums zu einem anderen Computer im DLR übertragen. Da die Datenmengen sehr groß sind, wird ein Herunterladen über das mobile Netzwerk vermieden. Der Zeitpunkt des Backups hängt von der Datenrate der Sensoren ab und kann unter realen Bedingungen besser abgeschätzt werden. Außerdem sollte ein Backup des gesamten Steuer-PCs vor jedem Softwareupdate und auch in regelmäßigen Abständen durchgeführt werden.

Eine Erkennung eines Fehlers eines Speichermediums kann durch die folgenden Symptome erfolgen [69]:

- Eine HDD gibt außergewöhnliche Geräusche wie ein Quietschen oder Ticken von sich,
- der Computer benötigt eine ungewöhnlich lange Zeit für ein Hochfahren,
- eine HDD ist bei einem Versuch, eine Datei zu öffnen, sehr leise,
- der Computer zeigt Fehlermeldungen mit einer unerwarteten Frequenz an, die besonders bei einem Lösch- oder Speichervorgang aufkommen,
- außergewöhnliche Änderungen von Datei- und Ordernamen kommen vor,
- Dateien sind nicht zugänglich oder fehlen,
- das Öffnen einer Datei benötigt ungewöhnlich viel Zeit und
- Informationen in Dateien sind durcheinander.

Um Gewissheit über einen Fehler des Speichermediums zu erlangen, kann eine Software verwendet werden, die einen Test durchführt.

5.1.7.2 Allgemeine Fehlerquellen in Computersystemen

Eine weitere Studie [70] hat sich mit den Ursachen des Ausfalls eines Computersystems im Allgemeinen beschäftigt. Dabei führten 22 HPC-Systeme des Los Alamos National Laboratory größtenteils wissenschaftliche 3D Simulationen durch und es kann sich dadurch ein Unterschied der Ergebnisse von diesen zu dem Steuer-PC ergeben. In der Studie wurden über neun Jahre 23000 Ausfälle dokumentiert und in die folgenden Kategorien eingeteilt:

- Hardware
- Software
- Netzwerk
- Umwelt
- Mensch
- Nicht identifizierbar

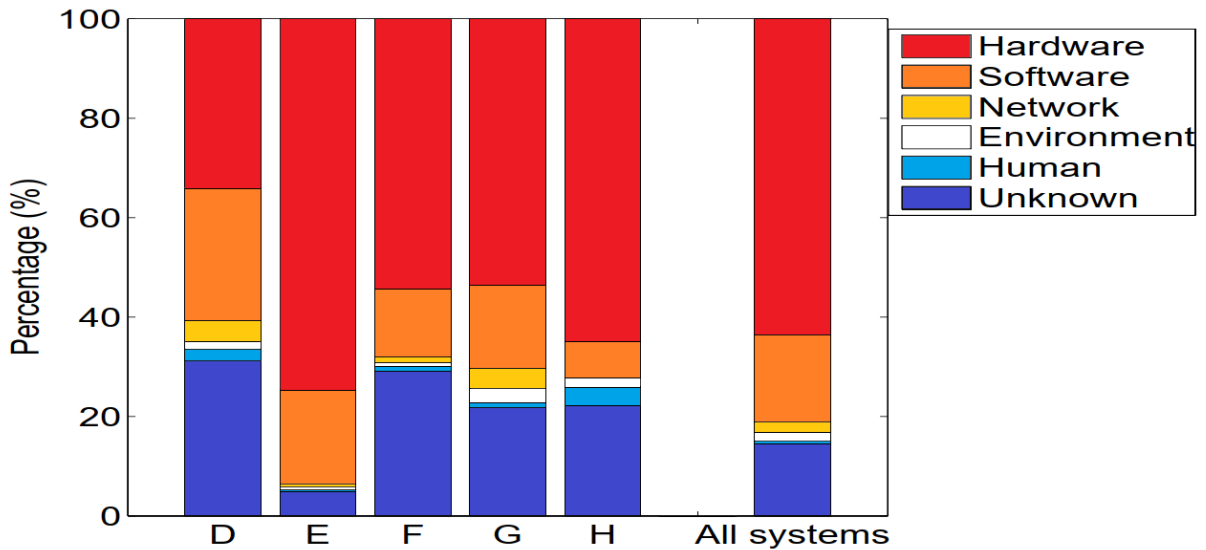


Abb. 5.11: Einteilung der Fehler in Kategorien bei den Prozessortypen D bis H und allen Systemen zusammen [70]

Abb. 5.11 zeigt die einzelnen Kategorien und ihre prozentualen Anteile einen Fehler ausgelöst zu haben. Dabei wurden die 22 HPC-Systeme in ihre Prozessortypen von A bis H eingeteilt, wobei die ersten drei Typen aus sehr wenigen Komponenten bestehen und deshalb nicht einzeln aber in allen Systemen berücksichtigt wurden.

So ist die größte Komponente die Hardware, welche für 30 bis ca. 60 % aller Ausfälle verantwortlich ist. Softwarefehler verbuchen einen Anteil von 5 bis 24 %. Wobei beide Kategorien etwa einen gleichen Anteil in System D beitragen. Nicht identifizierbare Fehlerursachen sind mit 20 bis 30 % außer bei Prozessortyp E für einen weiteren großen Anteil verantwortlich. Daher lässt sich daraus schließen, dass Hard- und Software dennoch die beiden größten Fehlerursachen sind, jedoch aber die Fehlerursachen Netzwerk, Umwelt und Mensch nicht als insignifikant betrachtet werden können.

Wichtig dabei zu betrachten ist die Ausfallzeit des Systems je nach kategorisierter Fehlerursache, wie es in Abb. 5.12 zu sehen ist.

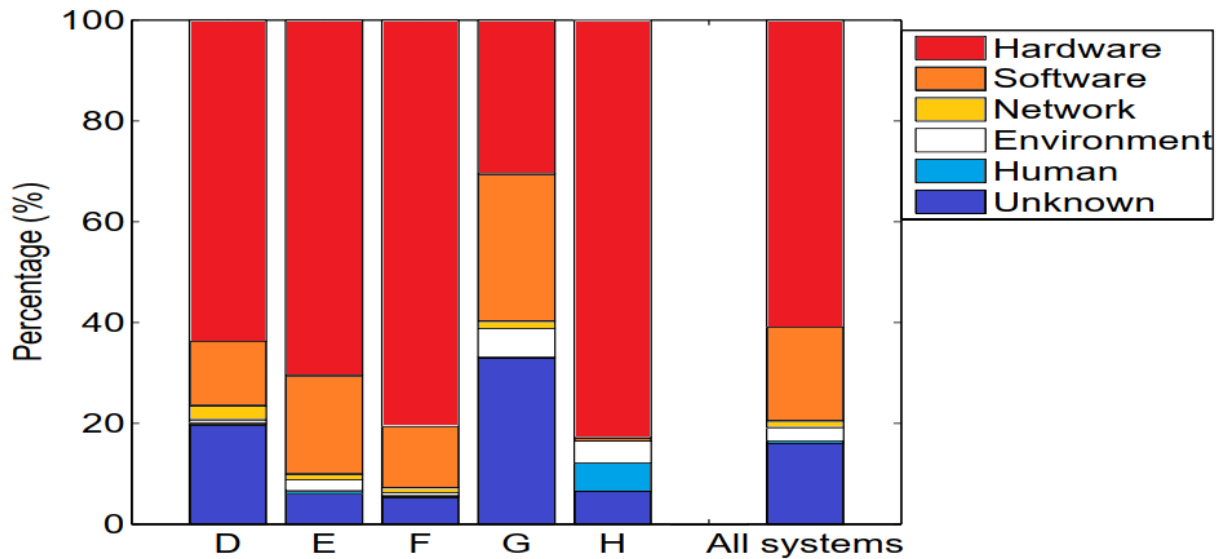


Abb. 5.12: Prozentualer Anteil der Ausfallzeiten der Prozessortypen D bis H und aller Systeme durch die einzelnen Fehlerursachen [70]

Zu erkennen ist, dass weiterhin die beiden größten Anteile der Hard- und Software geschuldet sind. Interessant ist jedoch die Ausfallzeit bei nicht identifizierten Fehlern, welche bei ca. 5 % für die Prozessortypen E, F und H liegt und somit niedriger bewertet werden sollte, als es Abb. 5.11 vermuten lässt. Bei den Prozessortypen D und G handelte es sich um HPC-Systeme mit neuer Technologie wie *Non-Uniform Memory Access* (NUMA) oder *symmetrische Multiprozessorsystem* (SMP), mit welchen zu diesem Zeitpunkt noch wenig Erfahrung vorhanden war. Nach zwei Jahren Erfahrung mit diesen Systemen sanken die nicht identifizierbaren Fehler von 90 % auf unter 10 %. Dies lässt sich auf den Steuer-PC für die Administratoren in einer reduzierten Variante übertragen, da man mit der Zeit Erfahrung mit dem System sammeln und somit direkt eine Aussage hinsichtlich eines Fehlers z.B. eines Speichermediums treffen kann.

Eine weitere Aufteilung der Studie hat ergeben, dass ca. 10 % aller Hardwarefehler durch das Speichermedium ausgelöst werden. Bei Softwarefehlern wurden das parallele Dateisystem, eine Plan-Software und das Betriebssystem als die häufigsten Fehlerquellen identifiziert. Eine wichtige Information dazu ist die Senkung der Fehler mit der Zeit, da Softwarefehler korrigiert und die Auslastung an die Hardware angepasst werden konnte. Daraus lässt sich für den Steuer-PC aussagen, dass Softwarefehler in eigenen Programmierungen trotz intensiver Testphasen auch erst durch den Programmeinsatz im realen Betrieb identifiziert und angepasst werden können. Bei

der Hardware wird sich die Auslastung auf diese auswirken und mit der Zeit zeigen, wie das System damit umgehen kann. Als Beispiel dient Abb. 5.13 aus [70].

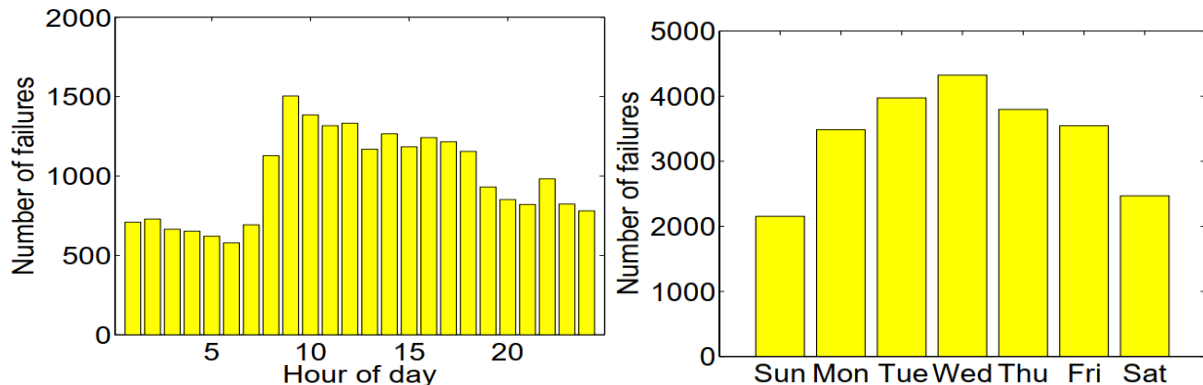


Abb. 5.13: Verteilung der Fehleranzahl über einen Tag (links) und einer Woche (rechts) [70]

So entstehen zu Zeiten hoher Auslastung zu den regulären Arbeitszeiten unter der Woche von acht bis 18 Uhr die meisten Fehler. Eine genaue Aussage der Fehlerwahrscheinlichkeit sowie -toleranz des Steuer-PCs lässt sich anhand dieser Ergebnisse nicht treffen. Jedoch sollte die Auslastung nur eine geringe Varianz aufzeigen.

Da die Komponenten im Steuer-PC auch in anderen Geräten des Schaltschranks wie den Switches, NTP-Server oder auch dem Messsystem vorkommen, gelten die Erkenntnisse des aktuellen Kapitels genauso für diese. Ein Fehler der Stromversorgung wird in Kapitel 5.1.10 betrachtet, weil alle Geräte dasselbe Spannungsniveau benötigen und keine einzelnen Netzteile notwendig sind.

Da die Hardware eine der größten Fehlerursachen ist, wird diese genauer analysiert. So sind nach [69] die häufigsten Quellen der Fehler einer Hardware die folgenden:

- Überhitzung des Computers,
- Unregelmäßigkeiten in der AC-Stromversorgung,
- entfernte, defekte oder unsachgemäß verbundene interne und externe Konnektoren und Kabel,
- minderwertige, überlastete oder fehlerhafte Stromversorgungen,
- inkompatibel Hardware-Treiber mit dem Betriebssystem,
- beschädigte oder inkorrekte Treibersoftware,
- ein Konflikt zwischen verschiedenen Hardwarekomponenten und
- Hardwarefehler, welche durch Alterung oder unsachgemäßen Umweltbedingungen ausgelöst wurden.

Nun werden alle Fehler, die durch die Stromversorgung entstehen können, in Kapitel 5.1.10 behandelt. Außerdem wird eine USV verwendet, welche eine zusätzliche Fehlertoleranz in das System hinzufügt. Für die Einhaltung der Umweltbedingungen sind Heizungen, Klimageräte und ein vor der Umwelt schützender Schaltschrank in das System implementiert worden. Konnektoren werden in Kapitel 5.1.11.5 auf Fehler analysiert.

5.1.7.3 Betriebssystem

Bei der Auswahl des Betriebssystems wurde sich für Windows 10 entschieden, da die Software des Messsystems „imc Studio“ nur auf dieser und älteren Versionen von Windows installiert werden kann. Darüber hinaus sieht das DLR-Sicherheitskonzept die Verwendung der aktuellsten Version von Windows vor.

Eine größere Sicherheit gegen Angreifer würden andere *Betriebssysteme* (OS, eng.: Operating System) wie MacOS oder Linux bieten, da für diese weniger Viren, Trojanische Pferde und andere Malware entwickelt wurden [69]. Dies liegt an ihrer geringeren Marktbeteiligung gegenüber Windows basierten Systemen. Aus diesem Grund sollte die Firewall über Linux betrieben werden. Dennoch sind verschiedene Sicherheitsmechanismen in Windows verfügbar. Durch eine automatische Log-Dateien Aufzeichnung und Analyse kann mittels Windows ein *Security Information and Event Management* (SIEM) realisiert werden, um Sicherheitsverstöße aufzeichnen zu können [71]. Dieses SIEM zeichnet z.B. alle Zugriffe einer Software auf das Netzwerk bzw. einen Port auf. Jedoch sollte die Auswahl der Log-Dateien mit Bedacht erstellt werden, da eine zu große Anzahl den Analyseprozess erheblich erschweren kann.

Ein weiteres Kriterium eines OS stellt die Stabilität dar, welche z.B. durch Abstürze definiert werden kann [69]. Dabei besitzen Windows und Linux den Nachteil, dass sie auf vielen verschiedenen Hardwaresystemen operieren und daher sehr vielfältig sein müssen. MacOS hingegen wird nur in Apple internen Geräten verwendet, sodass hier die Software nur für diese Hardware entwickelt wurde.

Die häufigsten Fehlerfälle eines OS sind nach [69] die folgenden:

- Fehlerbehaftete, beschädigte oder inkorrekt installierte Applikationen,
- Konflikte zwischen zwei gleichzeitig laufenden Applikationen,
- inkorrekte oder unvollständige Updates des OS,

- beschädigte Kerndateien,
- zu geringer Speicherplatz und
- mangelhafte Wartung der Festplatte

Eine Studie, welche die Fehlermuster von Windows 7 auf mehreren hundert Computern mit über 7000 Einzelfehlern über einen Zeitraum zwischen einem und vier Jahren analysiert hat, bietet eine gute Übersicht über Fehler in Betriebssystemen [72]. So können Fehler auf der Ebene der Applikation, des Services und des Kernels vorkommen. Ersteres stellt die ausgeführte Applikation dar, welche unter Windowssystemen mit der Dateiendung „.exe“ gekennzeichnet ist und auf Benutzerebene ausgeführt wird. Ein Service unter Windows kann z.B. der „MsInstaller“ sein und wird im Hintergrund mit minimaler bis keiner Benutzerinteraktion ausgeführt. Der Kernel bildet die unterste Schicht in einem OS und enthält beispielsweise die Speicher-, Prozess- und Geräteverwaltung sowie die Schnittstelle zur Hardware. Dieser ist auch für ein „Hängenbleiben“ oder „Crashen“ des OS verantwortlich. Insgesamt 17,34 % der Fehler waren auf den Kernel, 22,04 % auf die Applikationen und 60,63 % auf die Services zurückzuführen.

Verantwortlich für den markantesten Anteil war der Windows Update Service (WUS) mit knapp 53 %, da die Ausführbarkeit von weiteren Komponenten wie dem Speicherplatz, einer „Remote Procedure Call“ oder anderen Installationspaketen abhängt. Jedoch handelte es sich dabei um Software wie den Internet Explorer oder Microsoft Office, welche von Microsoft gestellt wird. Diese sind als nicht kritisch einzustufen, weil häufig ein Neustart das Problem behebt und die Software trotz des Updatefehlers weiterhin funktioniert. Zusätzlich handelte es sich bei dem WUS um einen Fehler des Windows Updates mit ca. 16 % Gesamtanteil aller Fehler. Dieser ist nicht immer trivial zu beheben und erfordert einen geschulten Administrator. Für den Fall des Steuer-PCs werden Windows Updates zunächst durch eine interne IT-Abteilung des DLR überprüft. Auch werden die Updates zuvor auf anderen Arbeitsrechnern installiert und können dort auf ein Fehlverhalten analysiert werden. Da ein Update zumeist einen Neustart erfordert, muss für den Steuer-PC ein Kompromiss zwischen Sicherheit und Ausfall der Messdaten ausgehandelt werden.

5.1.8 Messsystem

Das Messsystem besitzt genau wie der Steuer-PC Hardware Komponenten derselben Art, welche in Kapitel 5.1.7 auf ihre Fehler analysiert wurden. Messsystemspezifische Hardware wie die Messmodule können natürlich auch Fehler aufweisen.

Während der Umwandlung der analogen Messsignale kann es zu einem Bit Error bei verschiedenen Werten kommen. Dies können Offset-, Kalibrier- oder die Sensorparameter sein. Weiterhin kann bei der Datenübertragung durch zu große Störeinflüsse von außerhalb ein Bit Error entstehen. Allgemein gilt, alle elektronischen Komponenten in einer korrekten Umgebung frei von zu großen elektromagnetischen Einflüssen, zu geringen oder großen Temperaturen und Feuchtigkeit zu platzieren.

Die Software des Messsystems kann genauso wie bei dem Steuer-PC Fehler aufweisen, welche aber über ein fehlertolerantes Verhalten teilweise wieder korrigiert werden können. So wird bei einem Fehler während des Selbststarts dieser erneut durchgeführt und im Falle keiner Verbesserung des Fehlers eine Log-Datei für den Nutzer erstellt. Diese Fehlerbehandlung wird auch bei anderen Powereinstellungen, wie „Sleep“, „Resume“ oder „Sleep/Resume“ durchgeführt. [20]

Um einen korrekten Wert im Messprogramm erhalten zu können, muss in der Messsoftware auf dem Steuer-PC ein richtiger Umwandlungswert des gemessenen Stroms in die entsprechende Einheit des Sensors angegeben werden. Während diesem Eingeben kann ein Fehler des Konfigurators zu falschen Messergebnissen führen.

Die Messsoftware auf dem Steuer-PC liefert darüber hinaus eine Fehlerbehandlung für die Verbindung, Speicherung und das Starten einer Messung. Weiterhin wird in dem Handbuch der Messsoftware eine Beschreibung mit dem Umgang von Hardwarefehlern genannt. [73]

Eine Wartung ist laut des Herstellers nicht notwendig. Nur starke Verschmutzungen am Gehäuse sollten mit einem feuchten Tuch gereinigt werden.

Gerät / Komponente	MTBF [h]	Ausfallwahrscheinlichkeit pro Stunde
Imc BUSDAQflex	219.000 – 263.000	$3,8 \cdot 10^{-6} - 4,57 \cdot 10^{-6}$
Imc CANSASflex	219.000 – 263.000	$3,8 \cdot 10^{-6} - 4,57 \cdot 10^{-6}$

Tab. 5.4: MTBF und Ausfallwahrscheinlichkeiten des Messsystems

5.1.9 Überspannungsschutz

Um alle Komponenten vor einer überhöhten Spannung sowie einem überhöhten Strom zu schützen, wird ein Überspannungsschutz an allen aus- und eingehenden Daten- und Stromleitungen implementiert. Dieser weist je nach Art des Kabels bzw. des Anschlusses Unterschiede in sich und in seiner MTBF auf (siehe Tab. 5.5).

Bezeichnung	Anschluss	MTBF [Jahre]	Ausfallwahrscheinlichkeit pro Stunde
DEHNventil M TNS (FM)	Einzeladern für TN-S-Systeme	> 1.000	$1,14 \cdot 10^{-7}$
DEHNpatch Class E	1x RJ45	> 600	$1,90 \cdot 10^{-7}$
BXT BAS	-	> 10.000	$0,12 \cdot 10^{-7}$
BXT ML4 BD HF 24	2x Doppelader	> 300	$3,81 \cdot 10^{-7}$
BXT ML4 BE 24	4x Einzelader	> 300	$3,81 \cdot 10^{-7}$
BXT ML4 BD 24	2x Doppelader	> 300	$3,81 \cdot 10^{-7}$
DRC MCM XT	-	37	$30,85 \cdot 10^{-7}$
DGA AG N	Koaxial N	> 4.000	$0,29 \cdot 10^{-7}$
DGA G SMA	Koaxial SMA	-	-

Tab. 5.5: MTBF und Ausfallwahrscheinlichkeiten der SPDs

Bei der Auswahl der SPDs gilt es zu beachten, dass im Fall eines Blitzeinschlages nicht nur die Geräte innerhalb des Schaltschranks durch einen gezielten Kurzschluss geschützt, sondern zugleich auch die Sensoren durch das Ableiten des Blitzstromes zur Erdung hin abgesichert sind (siehe Abb. 5.14).

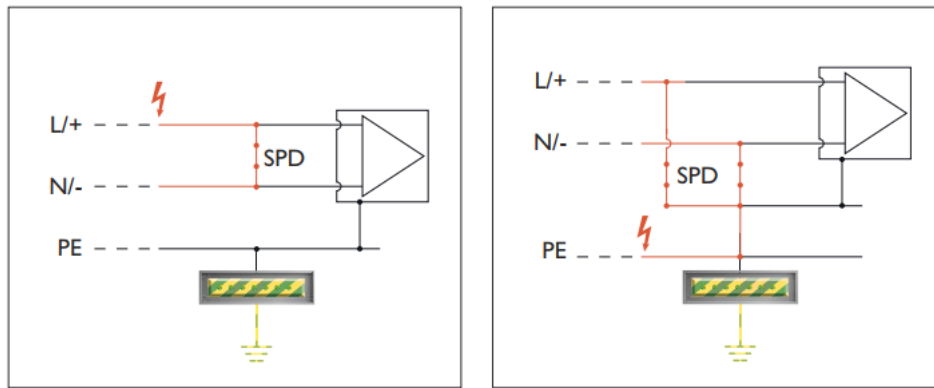


Abb. 5.14: Funktionsweise eines SPD über einen Kurzschluss (links) und einer Ableitung zur Erdung (rechts) [74]

SPDs unterliegen wie die anderen leitenden Bauteilen einer Degradation durch Schaltströme bzw. die dadurch erzeugte Wärme. Da ein transientes Verhalten mit hohen Strömen nur selten vorkommt, wird dieser Fehler als unkritisch beurteilt. Nach [75] können weitere Fehlverhalten auftreten, wenn:

1. die schützenden Eigenschaften des SPD durch mehrfache Blitzeinschläge überschritten werden.
2. der zulässige Nennableitstoßstrom, welcher je nach Impulsdauer des Blitzes Unterschiede aufweist, überschritten wird.
3. die zulässige Betriebstemperatur unter- oder überschritten wird.
4. kurze Spannungsanstiege bis zu der maximal zulässigen Dauerspannung auftreten und damit nicht erkannt werden.

Um eine Kontrolle der SPDs von außerhalb zu ermöglichen, werden diese an ein Überwachungsmodul angeschlossen. Somit können die Stati über den Steuer-PC und der Software von Dehn eingesehen werden. Da diese Anbindung nicht für die SPDs der GNSS-Antennen, Ethernetleitung und des Drehstromnetzes gilt, wird für eine Fernwartung eine andere Methodik empfohlen. Wenn die GNSS-Antennen keine Signale mehr empfangen, wirkt sich dies auf die Funktion des NTP-Servers und des Messsystems aus, wobei dieser Fehler gemeldet wird und manuell über eine Netzwerkverbindung eingesehen werden kann. Bei einem Auslösen des SPD des Drehstromnetzes wird die Stromversorgung kurzzeitig ausfallen und die USV den Betrieb aufnehmen. Dieser Vorgang kann über den WAGO PFC100-Controller eingesehen werden. Allgemein gilt, sobald ein überwachbarer SPD auslöst, müssen alle anderen SPDs überprüft werden.

Gemäß IEC 62305 müssen bauliche Anlagen mit einem Blitzschutz ausgestattet werden, sodass einem Brand und der Verletzung von Tieren und Menschen entgegengewirkt wird. Darin enthalten ist eine zeitlich wiederholende Kontrolle der SPDs je nach einer Einordnung in eine Schutzklasse. Diese variieren je nach Blitzkugelradius, Blitzkennwert, Schutzwinkel und weiteren Kenndaten. So müssen eine elektrische Prüfung und eine Sichtprüfung erfolgen. Erstere wird durch die Statusanzeige über die Software ersetzt und sollte besonders in den Monaten von Mai bis August mindestens einmal monatlich durchgeführt werden. Eine Sichtprüfung sollte jährlich erfolgen, da die nicht an das Überwachungssystem angeschlossenen SPDs keiner Kontrolle über das Netzwerk unterzogen werden können.

Die Software "Status Display + Service Console" bietet eine automatische Kontrolle und Protokollierung der Stati der SPDs. So muss jedoch das Programm direkt auf dem Steuer-PC geöffnet und eine Messung aktiviert werden, um einen Fehlerzustand erkennen zu können. Eine automatische Meldung über eine E-Mail oder ähnliches wird nicht übermittelt. Dabei wird empfohlen, die Software für eine regelmäßige Kontrolle und Protokollierung aller SPD-Zustände zu öffnen und andernfalls geschlossen zu halten. Bei einer Vermutung eines Blitzeinschlages und fehlenden oder fehlerhaften Messwerten sollte eine Prüfung mittels der Software erfolgen.

5.1.10 Stromversorgungen, USV und Relais

Die Stromversorgung stellt einen „Single Point of Global Failure“ gleichermaßen für alle Geräte dar. So kann die Stromversorgung durch interne oder externe Ereignisse beeinflusst werden. Eine fehlerhafte Verwendung kann ausgeschlossen werden, da die maximale Leistung mit 960 W und der maximale Strom mit 40 A (bei 24 V_{DC}) nur zu geringen Teilen ausgenutzt werden. Dieses Derating wird durch die Verwendung von insgesamt zwei Netzteilen bzw. Stromversorgungen nochmals herabgesetzt. Alle ausgewählten Geräte verwenden eine Spannung von 24 V_{DC}. Für sehr große Spitzenlasten kann die Stromversorgung für 5 s bis zu 60 A bereitstellen. Jedoch werden solche Einschaltströme nicht erreicht, solange nicht alle Geräte gleichzeitig angeschaltet werden. Daher müssen die Relais so programmiert werden, dass ein gleichzeitiges Einschalten verhindert oder eine automatische Routine eines nacheinander ablaufenden Einschaltens entwickelt wird. Dennoch bieten die Stromversorgungen einen Schutz für die Aufnahme eines zu hohen Stroms bei 10 A (250 V_{AC}). Der Ein-

gangsspannungsbereich liegt bei 180 V_{AC} bis 264 V_{AC} und die Netzfrequenz kann in einem Bereich von 47 Hz bis 63 Hz variieren. Da die Spannungsqualität des deutschen Stromnetzes geringere Schwankungen von 47 Hz bis 52 Hz und 207 V_{AC} bis 253 V_{AC} erlaubt [76], kann dies nur durch einen Blitzeinschlag oder Stromausfall zustande kommen. Diese Schlussfolgerung wird durch die Eigenschaft eines Blitzes, hohe Spannungen und Ströme bzw. elektromagnetische Felder zu erzeugen, getroffen. Eine genaue Analyse eines Blitzeinschlages wird in Kapitel 5.2 gegeben. Jedoch wird sowohl an der Einspeiseleitung, als auch an den Stromleitungen der Sensoren ein Überspannungsschutz verbaut, sodass diese Fehlermöglichkeit sehr gering gehalten wird.

Ein Hardwareausfall stellt einen internen Fehler dar, der jedoch durch externe Ereignisse beschleunigt werden kann. Allgemein besitzen die Stromversorgungen eine MTBF von 900.000 Stunden und sollten auch wegen des Designs des Deratings sehr unwahrscheinlich einen Ausfall verursachen.

Externe Einflüsse wie die Verletzung des Betriebstemperaturbereichs, Regen oder Kondensat werden gesondert in Kapitel 5.1.12 und 5.2 betrachtet, da der Schaltschrank als Schutz für alle Geräte dient. Die Stromversorgungen besitzen einen *International Protection* (IP)20 Schutz. Somit bieten diese zwar einen Schutz gegen Fremdkörper größer als 12,5 mm, ein Eindringen von Wasser können diese allerdings nicht verhindern. Diese Zahlen beziehen sich jedoch direkt auf die Schutzart und nicht den tatsächlich erreichten Wert, da die nächstmögliche Schutzklasse (IP30) bei einem Schutz von Fremdkörpern mit 2,5 mm Durchmesser liegt. Weiterhin wird in dieser Schutzklasse der Schutz gegen Berührung berücksichtigt, bei welchem das Gerät gegen einen Zugang mit einem Finger geschützt ist. Die IP30 Schutzklasse bietet einen Schutz gegen den Zugang mit einem Werkzeug. Dies kann ein Grund für die Einordnung der Stromversorgung in die niedrigere IP20 Schutzklasse sein, weil genau dies in den Lüftungsschlitzen möglich ist.

Für den Fall eines Stromausfalls durch das Versorgungsnetz oder einem Fehler der Stromversorgung wird für die wichtigsten Systeme eine USV vor den eigentlichen Verbrauchern geschaltet. Als einzige Geräte werden die Heizungen der Sensoren nicht gepuffert, da bei einem Stromausfall ein Herunterfahren aller Geräte stattfinden soll. Berücksichtigt werden muss die Einteilung aller gepufferten Systeme an der ersten Stromversorgung und aller nicht gepufferten Systeme an der zweiten Stromver-

sorgung. Dabei sollte jedoch eine Toleranz für ein Weiterlaufen von wenigen Minuten bei kleinen Ausfällen berücksichtigt werden, sodass nicht bei jeder kleinen Störung alle Geräte sofort heruntergefahren werden müssen.

Die USV an sich stellt ebenfalls eine Fehlerquelle dar, da sie zum einen den Strom der Stromversorgung weiterleiten und zum anderen bei einem Ausfall dieser einen Strom aus den Pufferakkumulatoren bereitstellen muss. Beide Funktionen können durch die Hardwarekomponenten beeinflusst werden, welche durch Alterung oder zu hoher Belastung ausfallen können. Zunächst muss der *Blei-Vlies* (AGM, eng.: Absorbent Glass Mat) Akkumulator der USV geladen werden. Sollte es während dem Ladeprozess zu einem Stromausfall kommen, so wird der Akkumulator nicht genügend Energie für den Betrieb der anderen Geräte bereitstellen können. Mit einer Kapazität von 12 Ah wird eine ungefähre Überbrückungszeit von 18 Minuten bei einer vollen Auslastung von 40 A erfolgen können.

Unabhängig von der MTBF besitzen die AGM-Akkumulatoren eine Lebensdauer, welche von der Temperatur abhängig ist, da es mit der Zeit zu einer Sulfatierung und Korrosion der Elektrodenplatten kommt ([77], [78]). So ist diese bei 20° C mit 5 Jahren, bei 30° C mit 4 Jahren und bei 40° C mit 3 Jahren spezifiziert. Da der Schaltschrank klimatisiert ist und die Akkumulatoren innerhalb des Schaltschranks in im unteren Bereich montiert werden, sollte eine Temperatur zwischen 20° C und 30° C maximal erreicht werden. Aus diesem Grund sowie einer Temperaturregelung während des Ladeprozesses muss der Akkumulator nach spätestens 4 bis 5 Jahren ausgetauscht werden. Abb. 5.15 zeigt die Abhängigkeit der Lebensdauer von der Temperatur zum einen für einen *Valve Regulated Lead-Acid* (VRLA)-Akkumulator, in dessen Kategorie der AGM-Akkumulator einzuordnen ist, und zum anderen für einen Lithium-Ionen Akkumulator.

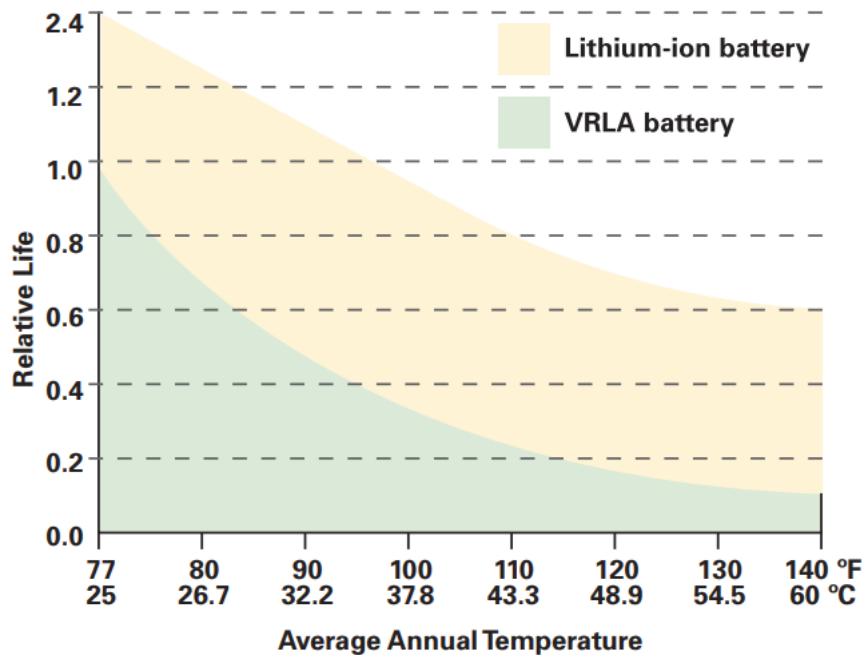


Abb. 5.15: Abhängigkeit der Lebensdauer eines VRLA-Akkumulators und eines Lithium-Ionen-Akkumulators von der Temperatur [79]

Weiterhin muss der AGM-Akkumulator für eine höhere Lebensdauer in einem vollgeladenen Zustand sein, da die Sulfatierung und damit die negative Beeinflussung auch auf die Kapazität schneller voranschreiten können. Da der Akkumulator eine jährliche Selbstentladungsrate von ca. 3 % besitzt, stellt dies eine geringe Gefahr dar, nichtsdestotrotz sollte eine regelmäßige Ladung durchgeführt werden.

Jedoch trägt die interne Korrosion der Elektrodenplatten den größten Anteil an einer endlichen Lebensdauer bei (siehe Abb. 5.16). Diese ist unvermeidbar, da die Elektroden ein reaktives Material darstellen und der Elektrolyt aus einer Säure besteht. Eine Korrosion kann so zu einem internen Kurzschluss führen, der das Lebensende eines AGM-Akkumulators bedeuten würde. Je höher die Umgebungstemperatur ist, desto schneller schreiten die Korrosionsprozesse voran. [78]

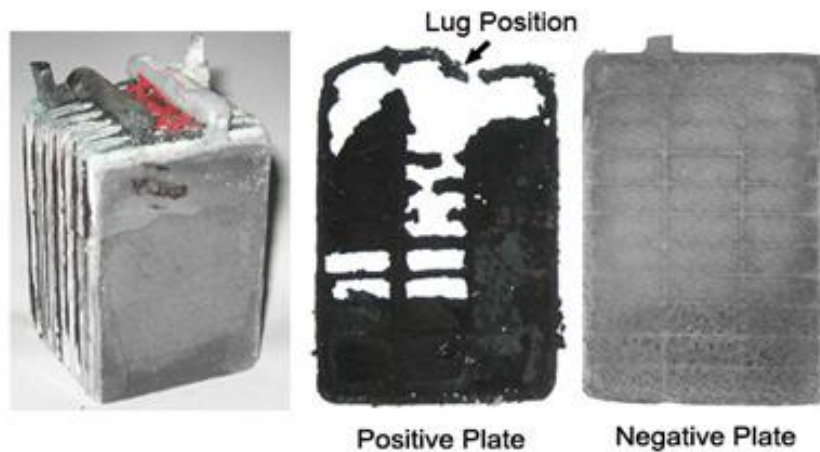


Abb. 5.16: Korrosion der Elektrodenplatten eines Blei-Säure-Akkumulators [78]

Für eine genaue Aussage der Restlebensdauer sendet der Akkumulator ein Frühwarnsignal, falls diese gering ausfallen sollte. Außerdem wird der AGM-Akkumulator in regelmäßigen Abständen durch das USV-Modul einer Belastungsprüfung unterzogen, sodass bei einer Umschaltung auf diese genügend Leistung erbracht werden kann.

Die Stromversorgungen sowie die USV werden mit dem PFC100-Controller verbunden und überwacht. Darüber können Informationen und Fehlerfälle direkt eingesehen werden. So können z.B. der Status und die aktuelle Temperatur des Akkumulators oder auch ein Ausfall der Stromversorgung und das damit verbundene Einschalten der USV eingesehen werden. Weiterhin werden Defekte an dem Akkumulator erkannt und gemeldet.

Das Leistungsmessmodul wird mit dem PFC100-Controller verbunden und misst die verbrauchte Leistung des 3-Phasen-Stroms. Dabei zeigt das Modul Fehler wie eine Über- oder Unterspannung, einen Überstrom oder auch eine Übersteuerung jeder einzelnen Phase an. Auch Fehlerströme werden erkannt und gemeldet. Dies wird über mehrere Statuswörter an den PFC100-Controller gesendet und kann dort eingesehen werden. Genauso wird ein eigener Fehler im Modul angezeigt. Im Fall eines Modulausfalls wird jedoch die Messtechnik weiterhin mit Strom versorgt und stellt daher keinen kritischen Fehler dar. Lediglich durch Korrosion der Kontakte kann ein Fehler auftreten. Dies ist jedoch unwahrscheinlich, da die verbaute Kontakttechnik der Firma WAGO sehr zuverlässig ist (siehe Kapitel 5.1.11).

Das Relais wird über die digitalen Eingänge angesteuert, welche als ein einzelnes Modul an den PFC100-Controller montiert werden. Ein Relais kann allgemein durch fünf Fehlerfälle beeinflusst werden [80]:

- Strukturfehler,
- Charakteristikfehler,
- Bewegungsfehler,
- Kontaktfehler und
- missbräuchliche Verwendung.

Letzteres kann für die ausgewählten Relais ausgeschlossen werden, da die verwendeten Ströme und Spannungen an den Lastkreis des Relais von WAGO angepasst sind und ein Dauerstrom von 6 A umgesetzt werden kann. Alle Geräte benötigen einen wesentlich geringeren Dauerstrom und die Relais unterliegen dadurch einem Derating, wobei eine niedrigere Ausfallwahrscheinlichkeit durch Degradation hoher Ströme realisiert wird. Jedoch muss bedacht werden, dass hohe Einschaltströme entstehen können. Dabei führen kapazitive Lasten, welche z.B. durch lange Leitungen zustande kommen, zu nochmals erhöhten Strömen als rein widerstandsbasierte Lasten [81]. Da die Relais jedoch einen maximalen Einschaltstrom von 20 A und die meisten Geräte eine Strombegrenzung besitzen, sollte dieser Wert nicht erreicht werden. Hohe Ströme sind in dem Sinn kritisch zu betrachten, da sie zu einer hohen Temperatur führen, die Kontakte aufschmelzen und kleine Schweißpunkte entstehen (siehe Abb. 5.17 und Abb. 5.18). Diese Punkte stellen einen Kontaktfehler dar und führen zu einem veränderten Kontaktwiderstand bis hin zu einem komplett miteinander Verschweißen der Kontakte, sodass ein Öffnen nicht mehr möglich ist.

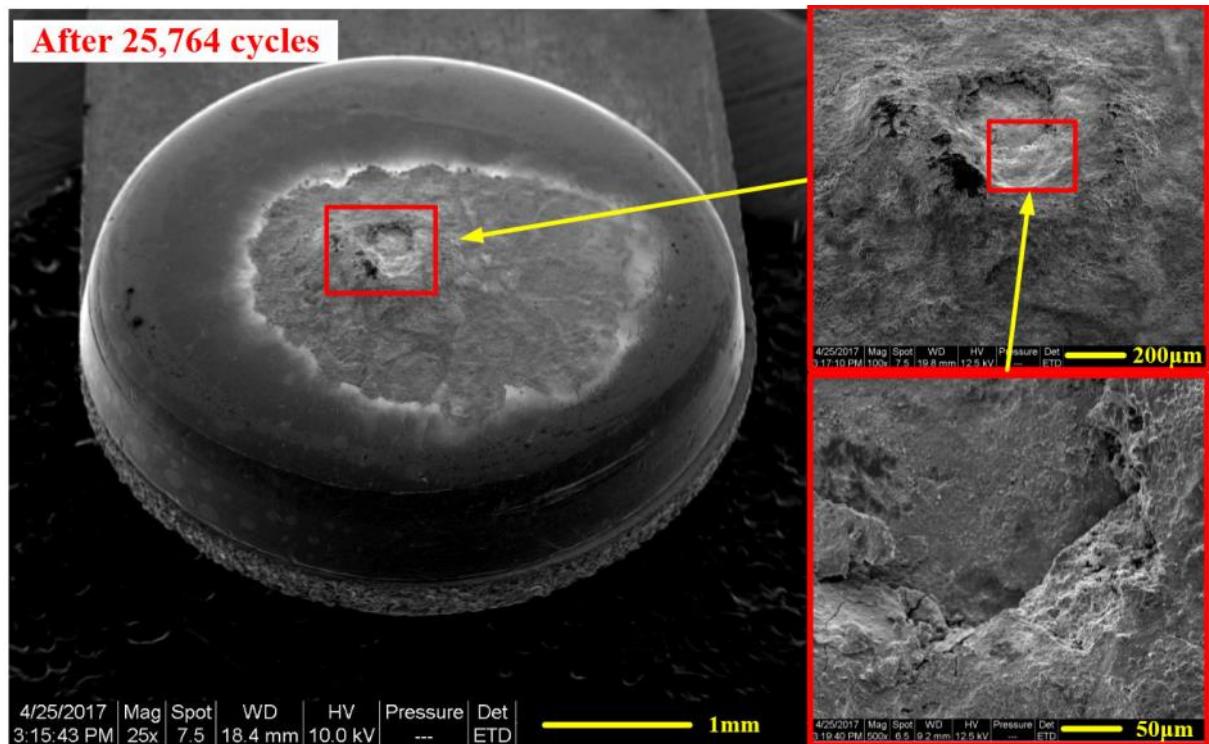


Abb. 5.17: Änderung der Kontaktoberfläche eines Relais nach 25.764 „Hot Switching“ Schaltzyklen [82]

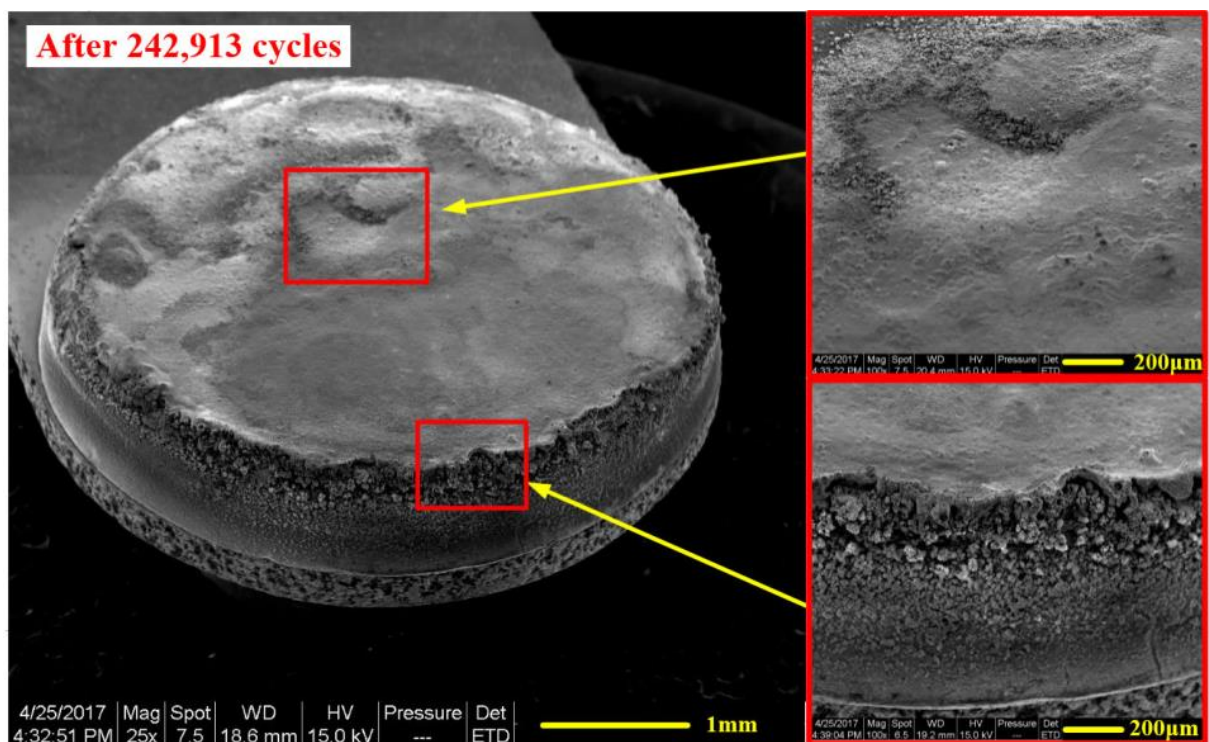


Abb. 5.18: Änderung der Kontaktoberfläche eines Relais nach 242.913 „Hot Switching“ Schaltzyklen [82]

Bei einem Signal mit hoher Leistung kann es bei einem Öffnen zu Funkenüberschlägen zwischen den Kontakten kommen ([81], [83]). Dies bewirkt einen kurzzeitigen

Spannungsanstieg und kann die Stromquelle sowie den Verbraucher beschädigen. Da es sich jedoch nur um niedrige Leistungen bis 116 W (Steuer-PC bei maximaler Leistung) aller geschalteten Geräte und Sensoren handelt, wird dieser Fehler als sehr unwahrscheinlich eingestuft.

Strukturfehler können größtenteils ausgeschlossen werden, weil der Betriebstemperaturbereich durch die Klimatisierung des Schaltschranks eingehalten wird und kein Schmelzen des Gehäuses durch zu hohe Temperaturen oder poröses Verhalten bei zu niedrigen Temperaturen auftritt.

Charakteristikfehler beziehen sich auf die verwendeten Bauelemente, um das Relais zu realisieren, und können je nach Design ein Bauteilversagen darstellen.

Ein Bewegungsfehler liegt dann vor, wenn das Relais nicht mehr korrekt schließen oder öffnen kann. Ein Grund dafür können erodierte Kontakte mit Oxidschichten oder anderen Fremdkörpern sein. Die verwendeten Relais besitzen einen *International Protection* (IP)20 Schutz und sind nur gegen Fremdkörper größer als 12,5 mm geschützt. Einen Schutz vor eindringendem Wasser besitzen diese demnach nicht. Daher könnte es je nachdem, wie gut der Schaltschrank abgedichtet ist, zu Verunreinigungen auf den Kontakten kommen. Die Kontakte erodieren durch ein zu häufiges Schalten und werden dadurch auch erhitzt. Dies führt schneller zu einem Bewegungs- bzw. Kontaktfehler, wird jedoch als unkritisch für das System des Schaltschranks eingestuft, weil eine Schaltung nicht in regelmäßigen kurzen Zeitabständen durchgeführt wird. Ein Öffnungsfehler wurde schon zuvor mit zu hohen Schaltströmen und dem Verschweißen der Kontakte in Verbindung gebracht.

Der Kontaktwiderstand wird durch die Anzahl der Schaltzyklen und hohe Schaltströme, welche zu Schweißpunkten führen, erhöht [80]. Dieser Widerstand führt zu einer Veränderung der Spannung, welche für einen Betrieb des angeschlossenen Geräts benötigt wird, und kann bis zu einem kompletten Ausfall ansteigen.

Die von WAGO verwendeten Relais (Art.-Nr.: 857-304) besitzen eine Lebensdauer von 50.000 Schaltungen unter einer ohmschen Last. Dies bedeutet, dass diese Angabe für ein „Hot Switching“ bzw. Schalten unter Last gilt. Die rein mechanisch mögliche Anzahl der Schaltungen liegt bei 5.000.000 und repräsentiert die Lebensdauer für ein „Cold Switching“ bzw. Schalten ohne Last. Dies zeigt, wie signifikant sich der Effekt der Schaltströme auf die Lebensdauer auswirkt [81]. Für das System des Schaltschranks wird diese Anzahl an Hot Switches jedoch nicht erreicht und ein Aus-

fall wird als sehr unwahrscheinlich eingestuft. Eine Beispielrechnung zeigt, dass ein Aus- und Einschaltvorgang (zwei Schaltungen) pro Tag für 68,5 Jahre durchgeführt werden kann, bevor eine Gesamtschaltanzahl von 50.000 Zyklen erreicht wird.

Zwei weitere Fehlerquellen können ein „Contact Bounce“ und „Contact Chatter“ darstellen [83]. Dazu muss zunächst die häufigste Funktionsweise eines Relais geklärt werden, wobei die Kontakte über eine Federmechanik zusammen- oder auseinandergebracht werden. Dabei wird diese Federmechanik mittels eines Magneten und einem magnetischen Feld, welches durch einen von Strom durchflossenen Spule induziert wird, bewegt. Bei beiden Effekten werden die Kontakte in einem geschlossenen oder offenen Zustand ungewollt aber häufig nur kurzzeitig in den anderen Zustand versetzt. Die Kontakte können dabei mehrere Male hin- und herspringen (Bounce). Ein „Hot Switching“ Relais kann aufgrund der schnell auftretenden Schaltströme schneller degradieren.

Bei einem „Contact Chatter“ wird dies durch externe Kräfte wie ein Rütteln z.B. durch ein Erdbeben oder vorbeifahrendem Zug oder durch einen Ausfall des Schaltsignals ausgelöst [84]. Letzteres ist eine dauerhaft anliegende Spannung an der Spule, um den Effekt des Elektromagnetismus hervorzurufen. Fällt diese Spannung unter einen gewissen Wert oder komplett aus, obwohl sie benötigt wird, so kann das magnetische Feld nicht aufrechterhalten werden und dauerhaft in der falschen Position verbleiben. Genauso verhält es sich bei einer ungewollt anliegenden Spannung. Die verwendeten Relais besitzen einen Eingangsspannungsbereich von $20,4 V_{DC}$ bis $28,8 V_{DC}$ bei einer Nennspannung von $24 V_{DC}$. Daher sollte man nie alle Geräte gleichzeitig schalten, um einen Spannungseinbruch durch die hohe Anzahl an erhöhten Schaltströmen zu verhindern. Andernfalls könnte sich eine wiederholende Sequenz aus dem Versuch des Anschaltens ergeben, was jedoch in einem Spannungseinbruch, dem Öffnen der Relais und damit dem kurzzeitigen Ausschalten aller Geräte resultiert. Bei einer zu hohen Spannung wird die Spule für das Erzeugen des magnetischen Feldes beschädigt und kann dieses nicht aufrechterhalten.

Ein „Contact Bounce“ wird durch das eigentliche Schalten und den Eigenschaften des Relais wie die Schließgeschwindigkeit oder die Kontaktkraft hervorgerufen, da hierbei ein mechanischer Zusammenstoß mit einer gewissen Elastizität stattfindet [85]. Jedoch wird nach einer gewissen Zeit der ursprünglich gewollte Zustand wieder erreicht.

Ein unbeabsichtigtes Schalten in den gegenteiligen Zustand kann nur durch einen Fehler des PFC100-Controllers entstehen. Dabei ist ein Softwarefehler während der Programmierung genauso wie ein Hardwarefehler der Signalleitung als unwahrscheinlich einzustufen. Die Software bzw. Programmierung des Controllers wird daher zuvor einigen Tests unterzogen. Da die Relais „Normally Open“ bzw. bei keinem Stromfluss in einem offenen Zustand geschaltet sind, werden bei einem Ausfall der Stromversorgung alle Relais geöffnet. Aus diesem Grund müssen die Relais über die USV weiterhin mit Strom versorgt und als letztes abgeschaltet werden. Zu beachten gilt die Einschaltsschwelle der USV von 22 V und die Spannungstoleranz der Relais bis minimal 20,4 V, sodass die Relais nicht geöffnet werden. Bei einem langfristigen Stromausfall sollte nur der PFC100-Controller mit den Switches, der Firewall und dem Mobilfunkmodul weiterbetrieben werden, um ein manuelles Einschalten bei Wiederherstellung der Stromversorgung durchführen zu können. Eventuell würde sich eine Programmierung des Controllers anbieten, bei welcher die Kapazität des Akkumulators begutachtet wird und auf Basis dieser eine Routine für ein Hochfahren aller Geräte programmiert wird. So kann bei einer Zunahme der Kapazität ein Hochfahren und bei einer Abnahme bis zu einer Schwelle von 20 % ein Abschalten der restlichen Geräte veranlasst werden.

Bei der Umsetzung der Relaisschaltungen muss jedoch beachtet werden, dass der PFC100-Controller über das Netzwerk mit dem „imc BUSFX/Net-Switch“ kommuniziert und bei Ausschalten des Switches die komplette Steuerung der Relais verhindert wird. Bei der späteren Programmierung des Controllers muss darauf geachtet werden, ob nach einem Ausschalten ein automatisches Anschalten nach wenigen Sekunden ausgeführt werden kann oder ob das Anschalten nur durch eine aktive Kommunikation möglich ist. Ein Zugriff auf den Controller ist durch die Firewall und einem Anmelden in einem Browser als sicher einzustufen. Weiterhin findet eine Kommunikation mittels SSH, TLS und Root-Zertifikaten verschlüsselt statt.

5.1.11 Steckertypen und Schnittstellen

In diesem Kapitel werden die einzelnen Steckertypen und Schnittstellen auf ihre Fehlerquellen untersucht.

Bei allen Steckverbindungen mit elektrischen Signalen ist der Kontaktwiderstand von großer Bedeutung, da ein zu großer Wert eine Dämpfung verursacht und beson-

ders bei niedrigen Betriebsspannungen die Funktion des Gerätes beeinflussen kann. Bei sehr hohen Strömen und einem zu hohen Kontaktwiderstand erwärmt sich die Kontaktstelle und kann zu einem Brand führen. Durch beispielsweise Korrosion können die Kontakte ihren Widerstandwert ändern. Um dies zu verhindern, werden zu meist dünne Schichten an Edelmetallen wie Gold oder Silber aufgetragen. Jedoch kann durch mechanische Belastung oder der falschen Wahl des Oberflächenmaterials des anderen Kontakts diese Schutzschicht wieder abgetragen werden.

5.1.11.1 RJ45-Stecker

Ein RJ45-Stecker besitzt nur eine mittlere Zuverlässigkeit gegenüber korrosiven Umgebungen, Vibrationen und hohen Temperaturen bzw. Luftfeuchtigkeit [86]. Spezifiziert ist dieser nach IEC 60603-7-3 für Vibrationen bis ca. 5g. In [86] wurden zunächst 375 Steckzyklen und daraufhin Tests entweder mit Luftfeuchtigkeit, welche mit mehreren Zyklen bei verschiedenen Temperaturen einherging, oder Gasgemischen durchgeführt. Gefolgt wurden diese von Temperatur- und Vibrationstests. Bei den Gasgemischen handelte es sich um vier verschiedene Arten, welche teilweise korrosive Eigenschaften aufwiesen und den Konnektor mehrere Wochen beeinflussen konnten. Der Vibrationstest wurde mit 25g und damit dem 5-fachen Wert der IEC-Konformität durchgeführt. Betrachtet wurden die Änderung des Kontaktwiderstands (siehe Abb. 5.19) sowie die Anzahl an Signalunterbrechungen mit einer zeitlichen Länge von 20 ns während des Vibrationstests (siehe Abb. 5.20).

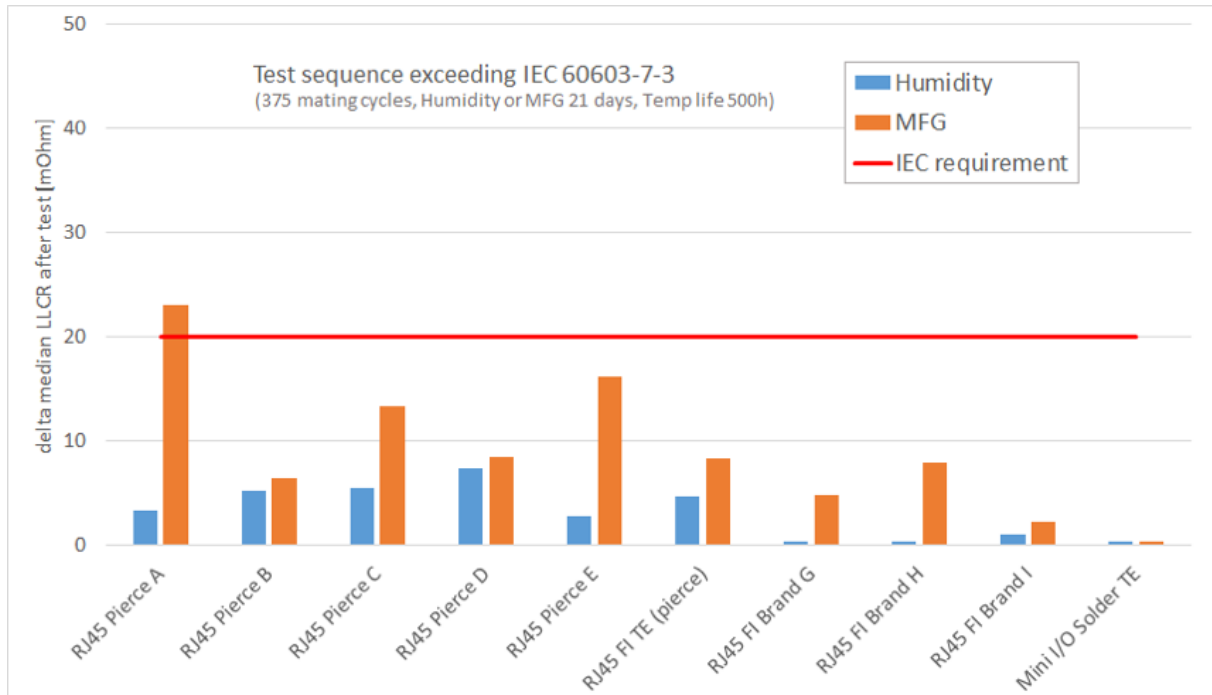


Abb. 5.19: RJ45 Änderung des Kontaktwiderstands nach Steck-, Umwelt- und Vibrations-tests [86]

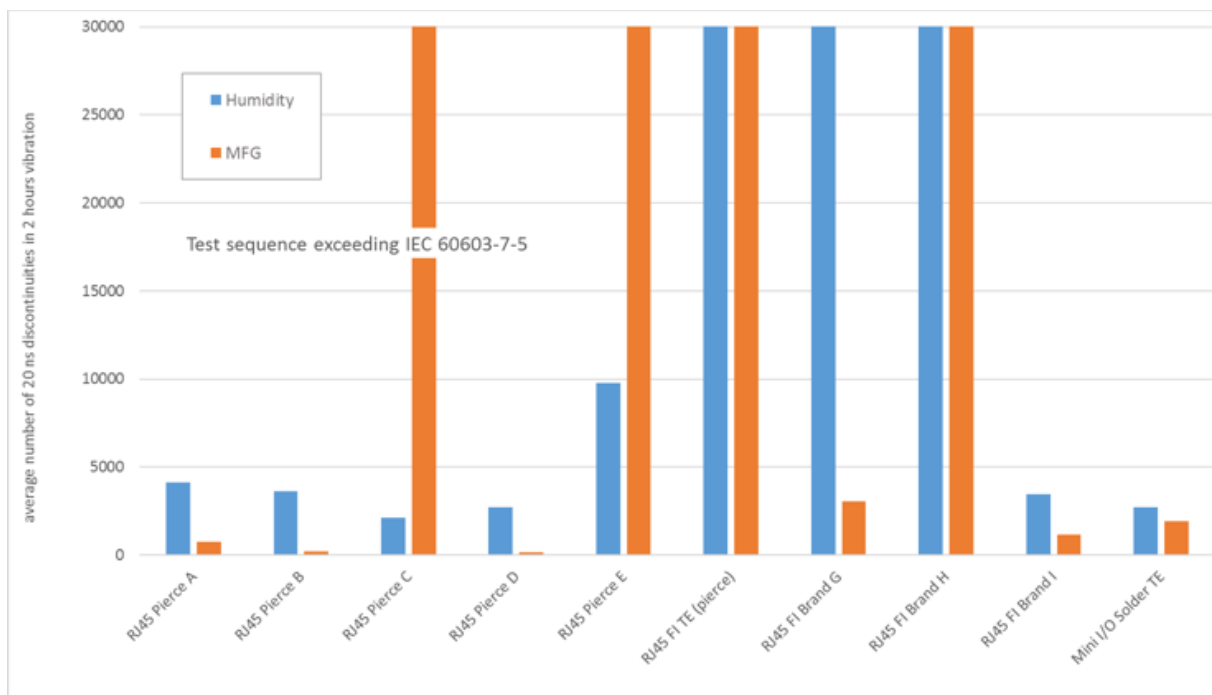


Abb. 5.20: RJ45 Testergebnisse bezogen auf die Anzahl der Verbindungsunterbrechungen (20 ns Länge) nach Steck- und Umwelttests und während des Vibrationstests [86]

Zu erkennen ist eine Erhöhung des Kontaktwiderstands bei allen RJ45-Steckern, wobei lediglich ein Stecker das IEC 60603-7-3-Limit von 20 mΩ überschreitet und damit keine Konformität mehr aufweist. Die Autoren weisen jedoch darauf hin, dass

schon nach dem ersten Test mit 375 Steckzyklen teilweise Änderungswerte von über 300 mΩ ermittelt werden konnten, welche hier nicht gezeigt werden.

Bei den Verbindungsunterbrechungen wird das praktische Verhalten sichtbar und es kann eine Aussage im realen Nutzen getroffen werden. So übertreffen gleich mehrere RJ45-Stecker das IEC 60603-7-5-Limit von 30.000 Unterbrechungen, wobei die Autoren eine kürzere Ausfallzeit aufgrund der erhöhten Baudrate als Fehler berücksichtigt haben. Jedoch lässt sich dies durch die Verwendung verbindungsorientierter Übertragungsprotokolle wie das *Transmission Control Protocol / Internet Protocol* (TCP-IP) kompensieren.

Bei nicht korrekt eingesteckter Weise mit einem zu niedrigen Krümmungsradius kann es zu einem „Lift Off“ bzw. Auflösen des Kontaktes an seiner Buchse kommen. Gegenüber diesen Fehlerquellen wird in der Industrie jedoch ein eigener Konnektor mit einem IP67 Schutz verwendet, welcher wasserdicht ist und damit keine Korrosionsgefahr besitzt, eine höhere Vibration aushält sowie den RJ45 Stecker gerade einführt. Diese Art von Verbesserung wird für das USA verwendet, da dort gravierendere Umweltbedingungen herrschen, als es im Schaltschrank der Fall sein wird. Weiterhin wird ein Ethernetanschluss für den Außenbereich gestellt. Dieser wird genauso einen verbesserten Schutzgrad gegen Witterung und Staub aufweisen.

5.1.11.2 Schuko-Steckdose

Steckdosen im Allgemeinen bieten eine Lebensdauer von 50 Jahren und mehr, welche jedoch von der Benutzung abhängt [87]. So wird bei einem regelmäßigen Ein- und Ausstecken eines Steckers eine geringe Menge an Material der Kontakte sowohl des Steckers, als auch der Steckdose abgeschürft. Mit der Einsatzzeit kann dadurch das Haltevermögen des Steckers in einer korrekten Position beeinträchtigt werden und nachlassen, sodass ein Stecker dort keinen festen Halt mehr besitzt. Dies wird im Falle des Schaltschranks keine Gefahr darstellen, weil keine regelmäßigen Änderungen von Steckern vorgenommen werden.

Weiterhin sind die Kontakte für Korrosion anfällig und sollten daher vor einer zu hohen Luftfeuchtigkeit sowie einem direkten Wasserkontakt geschützt werden. Diesen Schutz bietet der Schaltschrank mit seiner Klimatisierung für die innen befindlichen Steckdosen. Äußere Steckdosen müssen mindestens einen IP44 Schutzgrad aufweisen, welcher diese vor Witterungseinflüssen bewahrt. Um zudem einen Schutz

im gesteckten Zustand realisieren zu können, sind Schuko-Stecker mit Dichtungen für einen IP44 Schutzgrad erhältlich. Bei Feuerwehreinsätzen werden z.B. Bajonettverschlüsse mit Gummidichtungen verwendet, welche einem IP67 Schutz entsprechen und sogar zeitweiliges Untertauchen in Wasser standhalten. Bei einem Kurzschluss direkt an der Steckdose kommt es zu einer schwarzen Verfärbung (siehe Abb. 5.21). Sollte dies festgestellt werden, so kann die Funktion der Steckdose nicht mehr sichergestellt werden.



Abb. 5.21: Schwarze Farbänderung durch einen Kurzschluss einer NEMA-Steckdose [88]

5.1.11.3 RS485- und RS422-Schnittstelle

RS485 und RS422 sind sehr ähnlich zueinander und werden daher zusammen betrachtet. Der größte Unterschied liegt in einem gleichzeitigen Senden und Empfangen von Daten über zwei Twisted-Pair Kabel bei einer RS422-Schnittstelle, wohingegen eine RS485-Schnittstelle Informationen nur über ein einzelnes Twisted-Pair Kabel senden oder empfangen kann. Durch die Verwendung von differentiellen Signalen wirken sich Störströme bzw. -spannungen, welche durch induktive, kapazitive oder galvanische Mechanismen eingekoppelt wurden, nicht auf die Information aus. Werden die Ströme jedoch zu groß, so kann der Transceiver beschädigt werden. Dies gilt ebenfalls für den Fall, dass zwei RS422-Transceiver durch einen Soft- oder Hardwarefehler gleichzeitig auf den Bus zugreifen. In RS485-Transceiver wird dagegen eine Stromlimitierung verbaut. [89]

Weiterhin kann es zu einer Überspannung auf den Leitungen kommen, welche die Transceiver beschädigt. Diese können durch wackelnde oder gelöste Kontakte, gequetschte Kabel oder Lötverschmutzungen hervorgerufen werden, sodass die Stromversorgungsleitung mit der Datenleitung einen Kontakt herstellen kann. Daher

sind Transceiver entwickelt worden, welche Spannungen von $\pm 40\text{V}$, $\pm 60\text{V}$, oder auch $\pm 80\text{V}$ tolerieren können. [90]

5.1.11.4 Glasfaser und SFP-Transceiver

Ein SFP-Transceiver kann durch defekte Komponenten, einer Inkompatibilität oder Staubablagerung zu Fehlern führen ([91], [92]). Eine defekte Komponente stellt ein Bauteil des Transceivers dar, welches eine gewisse Lebensdauer besitzt.

Nicht alle Hersteller eines SFP-Transceivers versprechen eine volle Kompatibilität mit dem entsprechenden Switch. Daher können die Signale nicht korrekt an das Gerät oder den Switch weitergegeben werden. Aus diesem Grund muss bei der Auswahl der Transceiver zum einen auf eine Kompatibilität und zum anderen auf die korrekten Anschlüsse einer Glasfaser geachtet werden. Diese kann in einem Single- oder Multi-Mode betrieben werden.

Die Kontamination mit Staub kann zwei Stellen betreffen. Diese sind zum einen der Transceiver an sich und zum anderen das Ende der Glasfaser, welches mit dem Transceiver verbunden wird. So sollten nicht verwendete Ports und Transceiver immer mit einer Abdeckung versehen werden. Dies gilt auch für Ethernet-Ports.

Weiterhin kann ein beschädigtes Ende einer Glasfaser das Signal beeinträchtigen, ebenso wie eine gebrochene Glasfaser wegen einer Unterschreitung des kleinsten zulässigen Biegeradius das Signal blockiert. Daher darf bei einem Einstecken nicht zu viel Druckkraft aufgewendet und bei der Verlegung muss auf Schleifen bzw. den Biegeradius geachtet werden.

Bei der Auswahl des Transceivers muss zudem die maximale Länge der Glasfaser und maximale Übertragungsrate berücksichtigt werden, sodass die Anforderungen hinsichtlich der Distanz zum Mastenarray erfüllt werden können. Hierbei nimmt die geringe Sensitivität des Receivers einen entscheidenden Einfluss [93].

Eine Glasfaser kann unter drei Hauptmerkmalen zu einem alterungsbedingten Fehler führen, welcher sich meist auf die Dämpfung des Signals auswirkt [94]:

- Mechanische Beanspruchung und statische Ermüdung
- Strahlungsbedingte Dämpfungen
- Dämpfung durch diffundierten Wasserstoff

Letzteres kann durch „Low Water Peak“ Glasfasern weitestgehend verhindert werden [95]. Der Hauptgrund eines Fehlers liegt jedoch nicht an dem Alterungsprozess, son-

dern an externen Ereignissen, wie Ausgrabungen, Feuer oder auch Blitzeinschlägen. Da dies jedoch durch die Ablegenheit des Standortes als sehr unwahrscheinlich bewertet wird, kann der Alterungsprozess im alleinigen betrachtet werden. Dies führt zu einer Lebensdauer von ca. 25 Jahren, wenn es sich um eine in einem Kabelkanal vergrabene Glasfaser handelt [96]. Die Industrie bietet eine Vielzahl an Konnektoren für eine Glasfaser an. Diese besitzen je nach Typ ein Rating von 500 bis 1000 Steckzyklen [97]. Für den Außenbereich des Schaltschranks werden Stecker mit Gummidichtungen und einem IP67 Schutz empfohlen.

5.1.11.5 Konnektoren im Allgemeinen

Ähnlich wie die Konnektoren einer Glasfaser besitzen auch die SMA- und N-Stecker der Antennen ein Steckzyklenrating. Dieses beläuft sich auf bis zu 500 Steckzyklen, wobei ein Fehler von Konnektoren im Allgemeinen häufig durch folgende Ursachen ausgelöst wird [69]:

- Falsches Anschließen bzw. Krimpen des Konnektors an das entsprechende Kabel,
- Zusammenführen von zwei unterschiedlichen Konnektoren,
- Aufschrauben des Konnektors in einem nichtgeraden Zustand bzw. mit einem Winkel,
- Ausführen einer Schraubbewegung des gesamten Körpers anstatt des rotierenden Teil des Konnektors und
- Aussetzen des Konnektors von Staub, Feuchtigkeit, Lötflusmittel oder korrosiven Mitteln.

Diese führen zu Fehlern wie einer geringen maximalen Zuglast, einem unzureichenden Kontakt der Adern mit dem Konnektor, einem Kurzschluss durch herausstehende Adern oder einem unzureichenden Kontakt der Erdung. Falls diese Ursachen vermieden werden, so kann durch das wiederholt korrekte Auf- und Abschrauben des Steckers dennoch ein fehlerhaftes Verhalten vorkommen. Dabei wird mit jedem Verbinden das oberste Material, welches zumeist aus einem nicht-korrosiven Element besteht, abgetragen. Dieses schützt zum einen den Kontakt vor Korrosion und zum anderen sorgt es für einen niedrigen Kontaktwiderstand. Aus diesem Grund besitzen Stecker eine gewisse Steckzyklenanzahl, die es zu beachten gilt.

Alle Strom- und Signalleitungen werden über Klemmleisten als simple Messstelle geführt. Dabei werden die Adern dieser Leitungen sowie diejenigen des I/O-Links über die WAGO „Cage Clamp“ Technologie angeschlossen. Diese wird in Umgebungen mit Vibrationen wie in einer Eisenbahn verwendet und ist auf bis zu 2000 Hz mit Lasten von bis zu 20g sowie einer Schocklast von 100g getestet [98]. Auch passt sich die Druckkraft des Kontaktpunktes je nach dem Aderdurchmesser an und beschädigt den Leiter nicht, sodass ein mehrfaches Ein- und Ausstecken ohne Folgen durchgeführt werden kann. Als wichtigste Eigenschaft bietet die Cage Clamp einen gasdichten Kontaktpunkt, welcher somit korrosionsfrei bleibt. Jedoch wird der Rest der Ader durch die atmosphärischen Bedingungen beeinflusst und kann mit der Zeit korrodieren. Dies kann bei einem Herausnehmen und Wiedereinstecken zu einem erhöhten Kontaktwiderstand führen, sofern der vorige Kontaktpunkt nicht korrekt geklemmt wurde. Daher muss bei einem Herausnehmen nach längerer Zeit die Leitung begutachtet und eventuell gereinigt werden. Weiterhin wird ein hoher Stromfluss von 120 A/mm^2 für bis zu 1 s ermöglicht [98]. Gesamtbetrachtet wird dieser Kontakt zu keinem Fehler führen, wenn der Reinigungshinweis beachtet wird.

5.1.11.6 Strom- und Datenleitungen

Eine Leitung im Allgemeinen muss korrekt über den entsprechenden Standard an seinen Stecker angepasst werden. Bei Missachtung der richtigen Positionierung der Drähte kann das Gerät die Signale nicht mehr zuordnen und eine Kommunikation kann nicht aufgebaut werden. Weiterhin müssen die Umweltbedingungen wie Luftfeuchtigkeit oder der zulässige Temperaturbereich für ein Kabel mit seinen Anschlüssen eingehalten werden. Eine zu hohe Temperatur beispielsweise kann die Isolation zum Schmelzen bringen, sodass sich die getrennten Leiter berühren und damit ein Kurzschluss zustande kommt. Die Ummantelung und das Schirmgeflecht können auch durch Nichtbeachtung des kleinsten Biegeradius einen Schaden aufweisen und die Eigenschaften der Signalweiterleitung beeinflussen. Daher sollte die Kabelführung im Schaltschrank diesen zwingend einhalten und auch ein Verdrehen der Leitungen vermieden werden.

Vibrationen stellen eine weitere Gefahr für ein Kabel dar, da hierdurch eine Reibung an einem anderem Objekt ermöglicht wird. Bei dieser wird das Mantelmaterial mit der Zeit abgetragen und eine Ader kann freigelegt werden. Dies kann wiederum

zu einer Erdschleife führen, wodurch das Signal nicht mehr korrekt übertragen werden kann. Da sich der Schaltschrank in einer vibrationsfreien Umgebung befindet, wird dieser Fehlerfall als unwahrscheinlich eingestuft. Jedoch kann durch ein Vorbeifahren des Landwirts mit einem großen Fahrzeug eine kurzzeitige Vibration erzeugt werden. Da dies aber nur von kurzer Dauer ist und eher selten auftritt, stellt dies kein Problem dar. Hingegen Schwankungen des Messmastes durch Wind können Reibungseffekte auf die Kabel aufprägen. Die Kabel sollten daher in einem Kabelkanal sicher nach unten geführt werden. Genauso empfiehlt sich die Begutachtung der Kabel, welche nicht durch einen Kanal geschützt werden können, bei einer jährlichen Begehung des Messmastes.

Weiterhin wirkt ein Kabel als Antenne und empfängt dadurch Störungen, die sich in die angeschlossenen Geräte verbreiten und so zu einem Kommunikationsausfall führen können. Für eine Dämpfung von Gleichtaktstörungen werden sogenannte Ferritringe eingesetzt. Gegen Gegentaktstörungen können Eingangsfilter an den Geräten verwendet werden.

Zu beachten gilt auch die Länge eines Kabels, da der höchste Sensor auf einer Höhe von 102 m installiert wird. Dabei nimmt die Spannung mit der Länge ab und es sollte eine Anpassung des Wertebereichs jedes analogen Signals im Messprogramm durchgeführt werden.

Um die induktive und kapazitive Kopplung bei einem Blitzeinschlag zu verringern, sollte ein beidseitig angebrachter Schirm jedes Kabel umhüllen. Auch sollten alle Leitungen in einem Kabelkanal geführt werden, sodass Vögel und Nagetiere keinen Fehler verursachen können.

5.1.12 Schaltschrank

Der Schaltschrank stellt die Schutzhülle aller im Inneren befindlichen Geräte zur Außenwelt dar. So sorgt ein IP55 Schutz gegen ein Eindringen von Staub in schädigender Menge und Strahlwasser aus einem beliebigen Winkel. Um eindringendes Regenwasser zu vermeiden, steht das Dach für ein Ablaufen des Wassers etwas hervor. Bei den Durchgängen der Anschlüsse, welche außen vorgesehen sind, muss ein Schutz gegen Wasser und Staub vorgesehen werden. Sollte der Standort jedoch durch eine Pegelerhöhung der Elbe, welche ca. 5 km Luftlinie entfernt liegt, überflutet werden, so ist bietet der Schaltschrank nicht genügend Schutz. Daher wird dieser auf

ein Fundament in 0,5 m Höhe platziert. Falls der Landwirt Pestizide oder Düngemittel auf dem Feld verteilt, so besteht die Gefahr des Bespritzens des Schaltschranks. Ein höheres Fundament würde auch Schutz gegen diese Stoffe bieten, aber wiederum für einen Servicemitarbeiter schwerer erreichbar sein. Daher wird ein Kompromiss oder eine Umzäunung empfohlen.

Die Rahmen sind aus einem V4A Stahl gefertigt, welcher eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit besitzt und somit keinen Schaden durch die umgebende salzhaltige Luft oder Wasser nehmen wird. Das Dach wiederum besteht aus Aluminium, welches sich durch eine natürliche Oxidschicht vor Korrosion schützt.

Ein Aufheizen des Schaltschranks durch direkte Sonneneinstrahlung wird zum einen durch eine Doppelwand verlangsamt und zum anderen mit den Klimageräten verhindert.

Weiterhin können Fremdpersonen versuchen, sich einen Zugang in den Schaltschrank zu beschaffen. Der Schaltschrank weist dabei die Widerstandsklasse 2 nach DIN 1627 auf, bei welcher ein Einbrecher mindestens drei Minuten an Aufwand benötigen muss, um eingedrungen zu sein [99]. Dabei dürfen kleinere Werkzeuge wie ein Schraubendreher oder eine Zange verwendet werden. Zudem könnte der Landwirt mit einem Fahrzeug den Schaltschrank touchieren und die Wände verbiegen, sodass der Schutz der inneren Systeme nicht mehr gewährleistet werden kann. Um diese Gefahr näher beurteilen zu können, muss der genaue Standort des Schaltschranks auf Fahrwege des Landwirts begutachtet werden. Des Weiteren wird der Einsatz einer Kamera empfohlen, die von oben das Gebiet um den Schaltschrank beobachtet. Somit können Beschädigungen identifiziert und dementsprechend reagiert werden.

Um eine elektrostatische Aufladung zu verhindern, wird der Schaltschrank mit dem Fundament der des Messmastes verbunden und so eine Ableitung zur Erde hin hergestellt.

Als kritisch wird ein Umfallen durch starken Wind angesehen, da sich bei dem Einbau der Kühlgeräte ein hoher Schwerpunkt ergeben hat. Jedoch muss dies genauer analysiert werden, sobald alle Geräte implementiert wurden. Schwere Systeme wie die USV mit ihrem Akkumulator und die Heizungen werden im unteren Teil eingebaut, sodass sich eine Änderung des Schwerpunktes in Richtung Boden vollzieht und ein Umkippen damit einen größeren Kraftaufwand benötigt. Falls die Schwer-

punktverlagerung keine Verbesserung erzielt, muss der Schaltschrank mit dem Boden fest verschraubt werden.

5.2 Betrachtung der Fehler unter dem Blickwinkel

typischer Fehlerquellen

Im vorherigen Kapitel wurden die meisten Komponenten, welche in den Schaltschrank eingebaut werden, auf eine einzelne Sichtweise analysiert. Dies wird nun unter der Betrachtung von typischen Fehlerquellen in menschliche und technische Fehler sowie Ursachen, die auf die Umwelt zurückzuführen sind, ausgeweitet. Dabei werden die Einzelkomponenten in Systemen analysiert und Fehlerverkettungen erkannt.

5.2.1 Menschliche Fehler

Fehlerursachen, welche durch den Faktor Menschen hervorgerufen werden, sind unvermeidlich, weil genau dies uns zu Menschen macht und von Maschinen unterscheidet. Diese sind aber nur insofern fehlerfrei, wie sie durch einen Ingenieur und Programmierer entwickelt wurden.

So kann es bei der Installation der Geräte in den Schaltschrank oder auf dem Messmasten zu einer fehlerhaften Position, einem inkorrekten Einbauwinkel oder einer zu lockeren Interface-Verbindung kommen.

Weiterhin kann der Programmierer einer Software, welche z.B. für die Messung mit dem USA oder dem WAGO PFC100-Controller entwickelt wurde, einen unwisenden „Bug“ programmiert haben. Dagegen müssen alle Funktionen ausreichend auf ihre Fehlerfreiheit getestet werden. Genauso kann es bei der Einrichtung der Firewall und den Bestimmungen der VLANs und Ports zu Fehlern kommen.

Während dem Betrieb der Systeme könnte z.B. der Steuer-PC inkorrekt bedient werden, was wiederum zu einem Ausfall der Messung führen kann.

Grundsätzlich kann für das gesamte Design des Schaltschranks und Messmastes ein Fehler vorliegen. Dies ist jedoch als sehr unwahrscheinlich einzustufen.

Um menschliche Fehler zu vermeiden, sollte:

- der Ingenieur, Programmierer oder Techniker eine passende Qualifizierung zu seinem Arbeitspaket aufweisen oder eine Schulung dazu besucht haben,

- ein Vier-Augen-Prinzip bei der Installation aller Geräte und Verlegung aller Kabel angewendet werden,
- das Handbuch jedes Geräts sorgfältig beachtet werden,
- die entsprechende Norm für jedes System eingehalten werden und
- die Funktion einer Software für einen Benutzer einfach verständlich sein.

Dies sind bisher Fehlerfälle, die durch interne Mitarbeiter an diesem Projekt verursacht werden können. Jedoch können auch externe bzw. nicht an diesem Projekt beteiligte Personen einen Fehler auslösen. Dabei zu nennen sind:

- der Landwirt, der das Gebiet um den Messmasten bewirbt,
- verängstigte oder sich belästigt führende Anwohner und
- außenstehende Personen, die aus bestimmten Gründen Interesse für den Messmasten und Schaltschrank besitzen wie z.B. ein Hacker.

So kann der Landwirt mit einem Fahrzeug den Schaltschrank touchieren und bei einer Vorbeifahrt Staub aufwirbeln, der je nach Größe über 10m hoch steigen kann [100]. Dieser kann sich auf den Sensoren absetzen oder den Metallfilter des äußeren Kühlkreislaufts der Kühlgeräte verstopfen. Zusätzlich zu beachten gilt die Bewegung der Staubwolke in horizontaler Richtung. Diese hängt von der Fahrtgeschwindigkeit und der Windstärke ab und hat in einer Untersuchung Reichweiten von 50 m bis 800 m erreicht [101]. Daher müssen die Anzahl der Vorbeifahrten sowie die Fahrwege des Landwirts begutachtet werden, sodass eine Einschätzung hinsichtlich der Reinigung des Metallfilters durchgeführt werden kann.

Die beiden zuletzt genannten Personengruppen können über Vandalismus den Schaltschrank beschädigen, sich Zugang zu diesem beschaffen oder den Messmasten hochklettern und dort einen Schaden verursachen. Beängstigte oder sich belästigt führende Anwohner stellen tatsächlich eine reale Gefahr für das gesamte Projekt dar. So sind zwar schon seit 1995 in der Umgebung WEAs errichtet worden (siehe Abb. 5.22), aber dennoch gibt es besorgte Bürger laut einem Zeitungsartikel [102].



Abb. 5.22: Windparks in der Nähe des Standorts (roter Kreis) [103]



Abb. 5.23: Standort für DFWind mit dem Windpark Breitendeich (vorne), der Stadt Oederquart (hinter Breitendeich), dem Windpark Wechtern (mittig links) und der Elbe

Der Standort des Projektes wird die Richtlinie „Überblick zu den Abstandsempfehlungen zur Ausweisung von Windenergiegebieten in den Bundesländern“ [104] mit dem Empfehlungsabstand zu Wohngebieten in Niedersachsen von 400 m oder zwei Höhereinheiten der WEAs einhalten. Das Stadtgebiet von Oederquart liegt etwa 800 m und das von Freiburg etwa 2,5 km entfernt. Genauso wird das Bundes-Immissionsschutzgesetz eingehalten, welches einen maximalen Lautstärkepegel in allgemeinen Wohngebieten und Kleinsiedlungsgebieten außerhalb eines Gebäudes von 55 dB tagsüber (6-22 Uhr) und 40 dB nachts (22-6 Uhr) erlaubt [105]. Aus diesen Gründen wird eine Gefahr durch Vandalismus der Anwohner als unkritisch eingeschätzt.

Ein Hacker besitzt die Intention, das Netzwerk zu infiltrieren und Störungen im System zu verursachen. Dabei kann der Angriff auf verschiedenen Ebenen durchgeführt werden. Diese sind:

- die Hardware, auf welche über Ports zugegriffen werden kann,
- die Gerätesoftware, die infiltriert werden kann und
- die Kommunikation der Geräte, welche abgehört werden kann.

Eine gewisse Sicherheit dagegen bietet die Verwendung einer Firewall, VLANs, VPN-Verbindungen und verschlüsselten Übertragungsprotokollen. Zusätzlich werden folgende Methoden empfohlen:

- Der Standardname sowie das Standardpasswort jedes Gerätes muss umbenannt werden.
- Die Geräte sollten unterschiedliche Sicherheitszertifikate verwenden.
- Die Setzung eines Passworts muss strikten Regeln mit einer Mindestlänge, Zahlen und Sonderzeichen folgen.
- Accounts werden nur durch den Systemadministrator vergeben.

So wird hierdurch eine Risikominimierung durchgesetzt, sodass ein Zugriff einem Hacker nur direkt über den Schaltschrank möglich sein wird. Die Schnittstellen, welche sich außerhalb befinden, werden durch einen Switch bei Nichtbenutzung abgeschaltet und bei einer Verwendung mit einer MAC-Adresse gekoppelt. Dadurch wird es einem Angreifer dennoch möglich, über ein MAC-Spoofing Zugang in das Netzwerk zu erhalten. Generell werden nicht verwendete Ports der Switches abgeschaltet und müssen bei einer regulären Verwendung durch den Systemadministrator freige-

schaltet werden. Dennoch kann über einen verwendeten Port eines Switches ein Angreifer auf das Netzwerk zugreifen. Dies könnte einen Angreifer dazu veranlassen, den Schaltschrank gewaltsam öffnen zu wollen. Dies ist jedoch nach intensiver Recherche in Deutschland noch nicht vorgekommen. Es wird nur durch IT-Sicherheitsexperten von Szenarios berichtet, in welchen sich ein Hacker über das Internet und einer schlechten IT-Sicherheit einen Zugang zu Windparks verschaffen hätte können. Dennoch wird eine Dunkelziffer für solche Angriffe existieren.

Als kritisch muss die Verwendung der Außenschnittstellen angesehen werden, da dort ein Angreifer über mehrere Methoden einen Zugang erreichen könnte, wenn die Ports in Verwendung sind. Da dazu eine persönliche Anwesenheit erforderlich ist und auch hier nach einer intensiven Recherche dies noch nicht in Deutschland vorgekommen ist, wird das Risiko als unwahrscheinlich eingestuft. Dennoch wird wie bei den Hackerangriffen eine Dunkelziffer existieren.

Weiterhin können Menschen, welche das „Roofing“ oder „Rooftopping“ als Freizeitsport betreiben, in die dritte Kategorie eingeordnet werden. Dabei handelt es sich um das Beklettern von hohen Gebäuden oder Masten ohne jegliche Sicherung. Das Ziel ist jedoch das Objekt bis ganz nach oben zu besteigen und die Aussicht zu genießen. Keineswegs zählt Vandalismus zu der Intention der Kletterer. Dennoch ist es möglich, unbeabsichtigt an einem Ausleger einen Sensor zu beschädigen. Um auch hier eine Risikominimierung zu erreichen, muss der Zugang zu dem Messmasten beschränkt werden. Dies kann beispielsweise über das Starten der Steigleiter ab mehreren Metern über dem Grund und dem Erreichen mit einer externen Leiter oder einem gesicherten Schutz, welcher eine vorhandene Steigleiter abdeckt, realisiert werden (siehe Abb. 5.24).



Abb. 5.24: Steigleiter nur mit einer externen Leiter erreichbar [106] (links) und Steigleiter durch einen abnehmbaren Schutz erreichbar [107] (rechts)

5.2.2 Technische Fehler

Ein technischer Fehler kann in zwei Kategorien eingeteilt werden. Diese sind zum einen die Hardware, die durch bestimmte Prozesse und Bedingungen eine unterschiedliche Alterung besitzt, und zum anderen die Software, welche bis zu mehrere Millionen Zeilen an Code beinhalten kann.

Das Design einer Software besitzt zumeist keine „Safety Margins“ wie ein Dera-ting, das häufig bei einer Hardware angewendet wird [69]. Allgemein kann Software aus unterschiedlichsten Gründen, welche ausführlich in Kapitel 5.1.7 diskutiert wurden, einen Fehler sowohl auf Soft- als auch Hardwareebene provozieren. Dabei ist das OS die kritischste Software, weil dieses für den kompletten Betrieb und die Kontrolle weniger Geräte notwendig ist. Unabhängig davon sind jedoch die Steuerung und Überwachung mittels des PFC100-Controllers, der Klimageräte, der Switches, des Mobilfunkmoduls, der Firewall und des NTP-Servers. Somit kann der Steuer-PC in einem gravierenden Fehlerfall über die Relais neugestartet werden. Zu beachten gilt, dass der Einschaltvorgang nicht direkt nach dem Ausschalten durchgeführt wird, um den Kondensatoren des jeweiligen Geräts Zeit zum Entladen zu geben. Zumeist lassen sich Probleme mit der Software einzelner Geräte über einen Neustart beheben. Daher sollte dieser über die Relais ausgeführt werden. Dabei muss die selbst-

programmierte Software des PFC100-Controllers auf diesem geladen sein, weil nach einem Ausschalten eines Switches, der Firewall oder des Mobilfunkmoduls kein Kontakt mehr aufgebaut werden kann. Da auch der Teil des Schaltschranks, der durch andere Nutzer verwendet wird, über dieses Mobilfunkmodul und den Internet-Switch kommuniziert, sollten Wartungsarbeiten immer angekündigt werden. Zudem sollten Fehler in der Kommunikation, welche wiederholend oder langanhaltend sind, von jedem Nutzer gemeldet werden.

Bei einem Vorkommen von komplexeren Fehlern, die auch bei einem Neustart noch präsent sind, sollte der technische Support des jeweiligen Geräts benachrichtigt oder ein Fehler der Hardware in Betracht gezogen werden.

Hardwarefehler können durch unterschiedlichste Ursachen hervorgerufen werden, welche in Kapitel 5.1 für jedes Gerät einzeln analysiert wurden. Da jedes Gerät eine Form eines Computers besitzt, wurde dieser besonders detailliert einer Analyse in Kapitel 5.1.7 unterzogen. Die häufigsten Fehler einer fehlerhaften Stromversorgung der Komponenten werden in ihrem Aufkommen durch eine zuverlässige Stromversorgung mit der Überwachung mittels des PFC100-Controllers und der USV verringert. Sollte die USV einen Fehler aufweisen, wird dieser ebenfalls über den PFC100-Controller gemeldet. Zusätzlich ist das Stromsystem über einen Überspannungsschutz an allen ein- und ausgehenden Leitungen vor Blitzeinschlägen geschützt. Jedoch ist die Lebensdauer jedes Systems auch immer von seiner Auslastung abhängig, sodass eine genaue Aussage bzw. Quantifizierung einer Fehlerrate und MTBF erst im realen Betrieb und unter Aufkommen eines Fehlers identifiziert werden kann.

Allgemein gilt für jede Hardware, dass diese nicht dauerhaft auf voller Auslastung betrieben und damit ein Derating durchgeführt werden sollte.

5.2.3 Umwelt

Da sich das gesamte System des Messmasts und Schaltschranks in einer freien Umgebung befindet, müssen die Umweltbedingungen als Fehlerursache besonders betrachtet werden.

5.2.3.1 Zusammensetzung der Luft

Die Zusammensetzung der umgebenden Luft kann Korrosion oder Betauung verursachen und somit die einzelnen Geräte beschädigen. Ein hoher Salzgehalt der Luft begünstigt dabei eine Korrosion und ist durch die Nähe der Nordsee präsent. Nach

[108] ist der Einfluss von salzhaltiger Luft noch bis zu 80 km im Inland messbar und hängt von verschiedenen Faktoren wie der Windrichtung und –geschwindigkeit oder der Küstentopografie ab. Jedoch ist der Salzgehalt der Luft am Standort niedrig bis mittelmäßig im Vergleich zu direkten Gebieten auf den Ozeanen [109]. Genauso begünstigen Pestizide und Düngemittel bzw. organische Substanzen eine Korrosion [110]. Daher werden alle Geräte durch den Schaltschrank gegen diese Einflüsse weitestgehend geschützt. Der Schaltschrank setzt sich außerdem aus Aluminium und V4A Stahl zusammen, welche einen guten Schutz gegen Korrosion bieten. Dennoch ist ein langsam voranschreitenden Korrosionsprozess durch aggressive Stoffe zu berücksichtigen [111]. Durch einen IP55 Schutz sind auch die inneren Geräte vor den korrosionsfördernden Stoffen ausreichend geschützt. Jedoch sollten die äußeren Bauteile, wie die Klimageräte und Außenschnittstellen jährlich kontrolliert werden. Genauso bestehen die Sensoren auf dem Messmasten zwar aus korrosionsbeständigen Materialien, diese unterliegen aber dennoch einem langsamen Korrosionsprozess. Daher sollten diese bei einer jährlichen Kontrolle auf äußerliche Korrosion begutachtet werden. Wenn sich die Korrosion z.B. auf einer Leiterplatine ausbreitet, so können Störungen oder das endgültige Lebensende des Geräts als Folge daraus resultieren.

5.2.3.2 Niederschlag und Überschwemmung

Des Weiteren können Regen, Nebel und Kondenswasser zu einem Wasserschaden und Korrosion führen. Durch eine ausreichende Klimatisierung des Schaltschranks mittels Kühlgeräten für hohe Temperaturen und Heizungen für niedrige Temperaturen sowie dem IP55 Schutz sind die Geräte ausreichend vor Witterungseinflüssen geschützt. Der Schaltschrank bietet jedoch keinen Schutz in einer permanenten Wasserumgebung, wie sie bei einer Überflutung durch ein Hochwasser der Elbe entstehen könnte. Diese liegt in etwa 5km Entfernung zu dem Standort. Die dortigen Deiche besitzen eine Höhe von ca. 9 m und werden in Zukunft erneuert, da ein steigender Wasserpegel durch die Folgen des Klimawandels befürchtet wird ([112], [113]). Im Fall eines Deichbruchs würde das Wasser höher als 4 m am Standort stehen und somit den Schaltschrank überfluten [114]. Da dieser jedoch regelmäßig kontrolliert und in Zukunft erhöht wird, ist das Gefahrenpotential als niedrig einzustufen.



Abb. 5.25: Deich nördlich des Standorts

Weiterhin kann Hagel einen Schaden an den Sensoren und dem Schaltschrank verursachen (siehe Abb. 5.26).



Abb. 5.26: Hagelschaden an einem Autodach [115]

Laut Deutschem Wetterdienst (DWD) variiert die Häufigkeit der Hagelniederschläge regional, kann aber nicht auf einen einzigen Ortspunkt bezogen werden. Die mittlere jährliche Anzahl an Hageltagen liegt in Hamburg-Fuhlsbüttel bei 1,3 und kann auf den Standort übertragen werden [115]. Die höchste Wahrscheinlichkeit für Hagel besitzen dabei die Sommermonate von Mai bis August. Da Hagelkörner zumeist einen Durchmesser von wenigen Millimetern besitzen und im Norden Deutschlands nur an wenigen Tagen fallen, wird die Gefahr eines Hagelschadens als niedrig eingestuft [116]. Auch sind Sensoren gegen Hagel in kleinen Größen widerstandsfähig. Der Hersteller des USA beispielsweise hat bei ca. 3000 operationellen Geräten bisher keinen Hagelschaden als Fehlerquelle ermittelt [58].

5.2.3.3 Eisbildung des Messmasts und der WEAs

Im Winter kann es zu Temperaturen kommen, in dem Wasser gefriert und dementsprechend sich Eiskristalle aus der Feuchtigkeit an dem Messmasten und den WEAs ausbilden können (siehe Abb. 5.27).



Abb. 5.27: Eisbildung an einem Rotorblatt einer WEA [117]

Das Eis kann bei Temperaturen oberhalb des Gefrierpunktes oder durch starke Winde zu einem Abbruch und Herunterfallen geführt werden. Damit stellt dies für Menschen sowie in der Umgebung befindliche Objekte am Boden ein Gefahrenpotential dar. Eine reale Einschätzung, ob sich Eis ausbilden und in welcher Größe dieses vorkommen wird, kann erst unter realen Bedingungen mit einem aufgebauten Mess-

masten getroffen werden. Insbesondere die Temperaturen und damit Eisbildungsbedingungen können je nach Höhe über dem Grund variieren [118]. Jedoch lässt sich aus meteorologischen Daten mehrerer Jahre eine erste Beurteilung erstellen. Genauso können erste Kenntnisse von „Icing“ Szenarien an WEAs in Deutschland aus [119] entnommen werden (siehe Abb. 5.28).

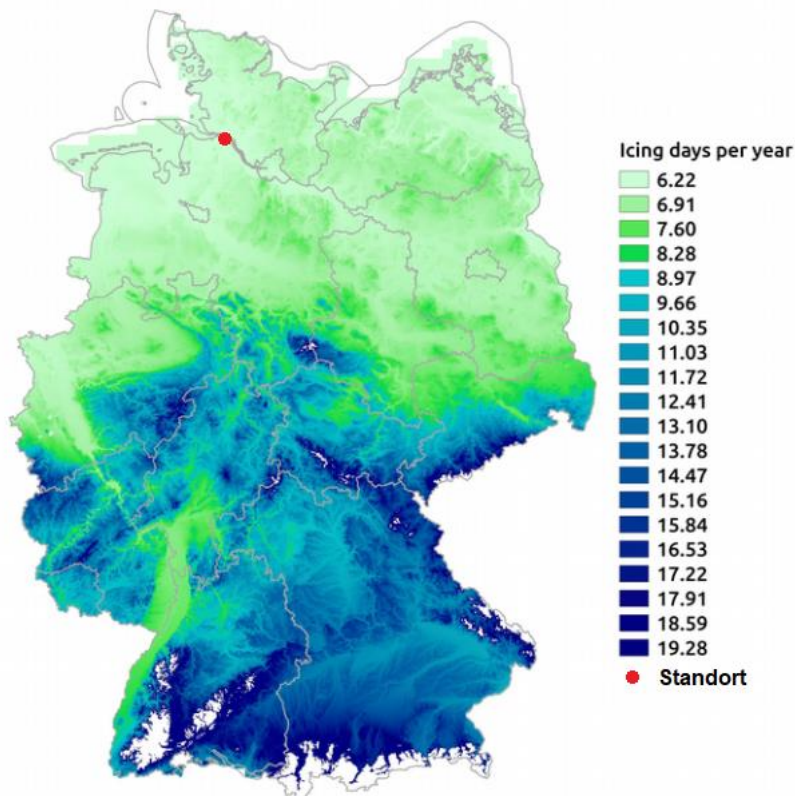


Abb. 5.28: Anzahl der Tage in Deutschland, an welchen sich Eis ausbilden kann, für Höhen bis 700 m kalkuliert [119]

So existieren am Standort ca. sieben Tage im Jahr, an denen die Bedingungen für eine Eisbildung ausreichend sind. Die Größe des sich ausbildenden Eises hängt von den örtlichen Bedingungen sowie den Eigenschaften der Rotorblätter ab. Demnach gestaltet sich eine Einschätzung schwierig. Jedoch wird nach [119] für eine einzelne WEA angenommen, dass sich in Deutschland 50 bis 50.000 Eisfragmente pro Jahr ausbilden und herunterfallen. Da sich der Standort im Norden Deutschlands befindet und dadurch weniger Eisbildungstage im Jahr existieren, kann eine Zahl der Eisfragmente im unteren Bereich von 50 bis 200 angenommen werden. Der Unterschied zwischen einer WEA und einem Messmasten liegt in einem Wegschleudern des Ei-

ses durch die Rotation der Blätter und damit in einem größeren Gefahrenradius um die WEA (siehe Abb. 5.29 und Abb. 5.30).

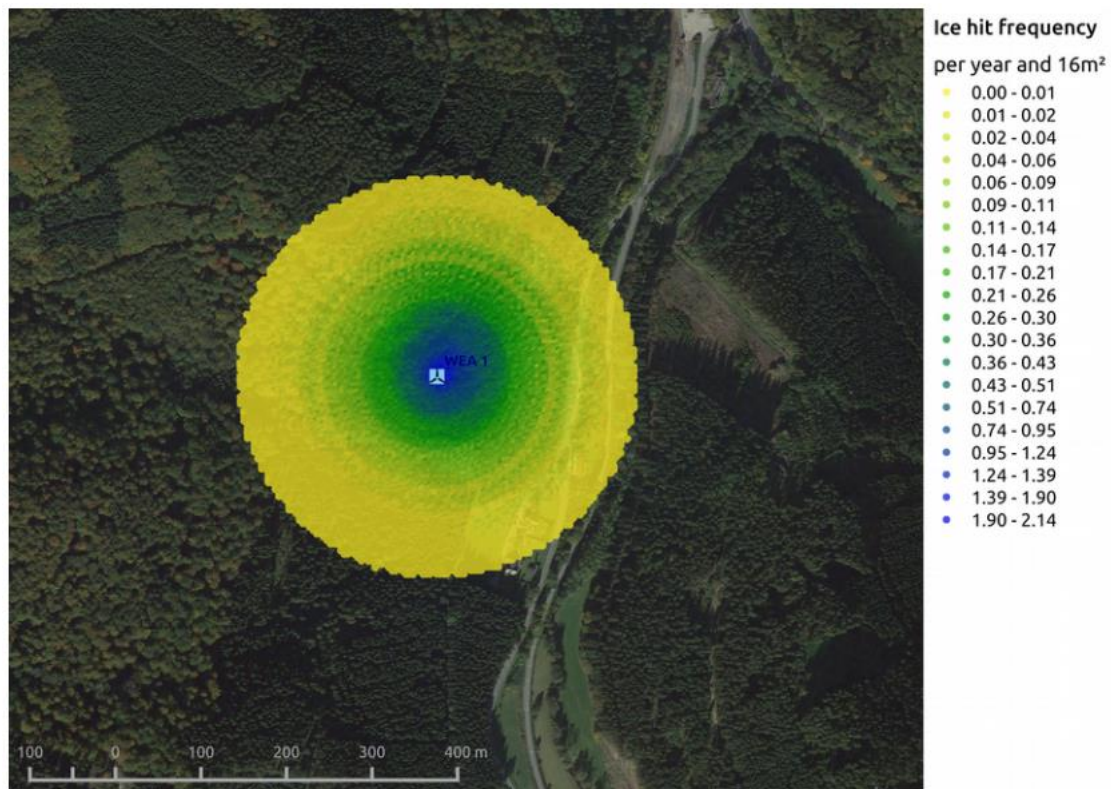


Abb. 5.29: Verteilung des Eises bei einem Abbrechen an einer WEA ohne Berücksichtigung des Terraineinflusses [119]

Der Radius des Eisfalles (Ice fall) und –wurfes (Ice throw) beträgt in etwa eine Höheneinheit der Gondel addiert mit dem Rotordurchmesser. Aus Abb. 5.30 wird ersichtlich, dass nur ein geringer Teil der Eisfragmente bei einem Wurf an den Rotorblättern mit einer Drehbewegung die Gondelhöhe addiert mit dem Rotordurchmesser überschreiten. Da sich Feldwege und regelmäßig befahrene Straßen in einem genügend großen Abstand zu den WEAs und Messmasten am Standort befinden, wird das Risiko einer Verletzung eines Menschen als sehr niedrig betrachtet. Jedoch muss das Beschädigen des Schaltschranks durch einen Eisabfall an dem Messmasten in Betracht gezogen werden. Daher sollte zunächst der Messmast begutachtet werden, um einen passenden Aufstellort wählen zu können. Weiterhin wird der Schaltschrank ca. 220 m von einer WEA entfernt stehen, sodass hierbei ein Eiswurf eine Beschädigung hervorrufen kann, sofern die WEA eine Gondelhöhe addiert mit dem Rotordurchmesser von 195 m überschreitet.

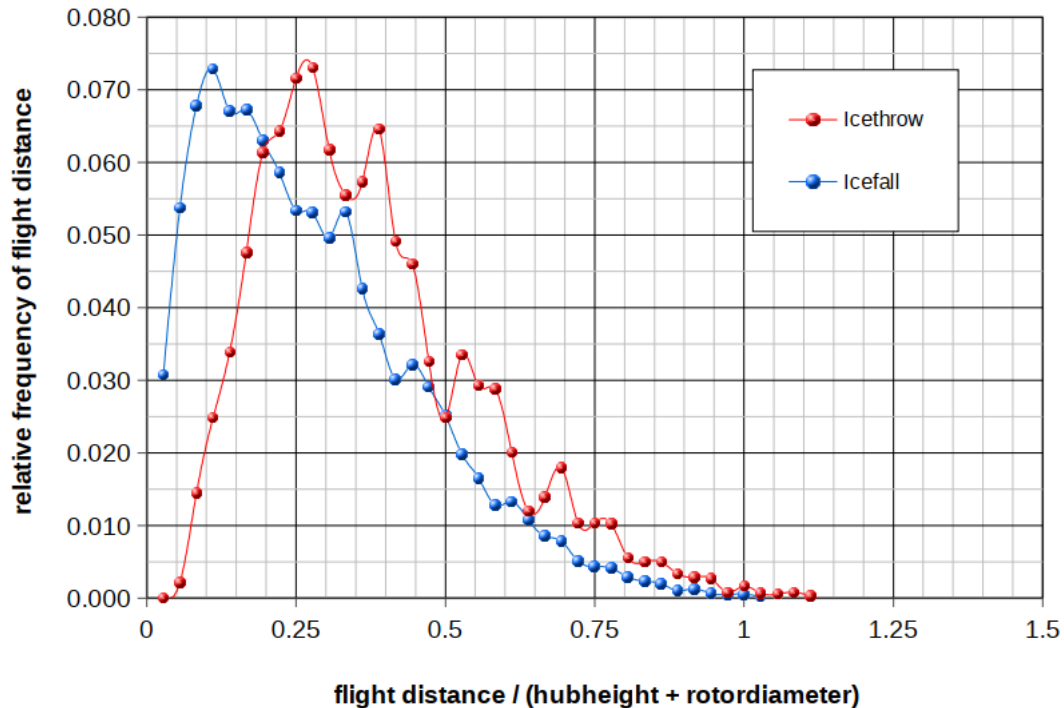


Abb. 5.30: Verteilung der Eisabbrüche für einen Fall und einen Wurf durch die Rotation der Rotorblätter in nicht komplexem Gebiet [119]

5.2.3.4 Blitzeinschlag

Eine weitere Gefahr aus der Umwelt geht von einem Blitzeinschlag aus. Bei diesem ist jedoch nicht nur der direkt getroffene Stromkreis beteiligt, da es zum einen zu einer induktiven Kopplung und zum anderen zu einer kapazitiven Kopplung auf einen anderen Leiter kommen kann. So bewirkt eine Änderung der Stromstärke ein sich veränderndes Magnetfeld um den Leiter. Parallel verlaufende Leiter werden so zum einen angezogen oder abgestoßen und Kabelbrüche sowie Deformierungen können die Folge sein. Zum anderen erzeugt ein sich veränderndes Magnetfeld einen Strom auf einen anderen Leiter, welcher somit in diesen Stromkreis induziert wird und dort zu einem Schaden führen kann. Eine kapazitive Kopplung kommt durch den Potentialunterschied zweier Leiter zustande und eine Verschiebung der Ladungen findet statt. Diese hohen Ströme erwärmen den Leiter so stark, dass die Ummantelung schmelzen und so ein Kurzschluss entstehen kann. Auch kann der Leiter schmelzen (siehe Abb. 5.31). Die erreichte Temperatur hängt jedoch von der zeitlichen Länge und Stromstärke des Blitzes ab.

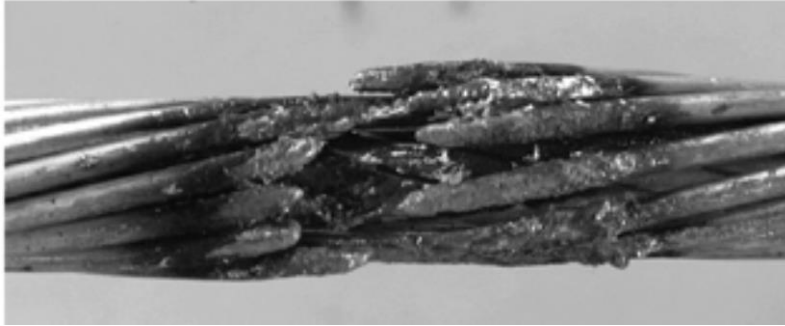


Abb. 5.31: Schmelzen eines Leiters durch einen Blitzeinschlag [120]

Um beiden Kopplungsmechanismen entgegenzuwirken, müssen die Daten- und Stromleiter getrennt von dem Leiter der Blitzfangstangen geführt werden. Zusätzlich müssen die Kabel in einem isolierenden Kanal geführt werden. Ist jedoch ein Daten- oder Stromkabel direkt betroffen, so wird nicht nur das SPD dieses auslösen, sondern auch das der anderen Leiter. Allgemein gilt, dass bei einem Ausfall eines SPD die anderen SPDs und alle Sensoren mit ihren Daten- und Stromleitungen überprüft werden sollten.

Um einen Blitz von den Sensoren abzuhalten und von diesen entfernt abzuleiten, werden Blitzfangstangen an jedem Ausleger auf jeder Höhe montiert und am Grund des Mastes geerdet. Die Installation auf jeder Höhe ist erforderlich, da sich ein Plasmakanal nicht immer an dem höchsten Punkt des Mastes ausbildet [58]. Jedoch bieten diese Blitzfangstangen nur einen schirmartigen Schutz von ca. 60° zu allen Seiten, sodass dennoch eine geringe Gefahr eines direkten Blitzeinschlages an einem Sensor besteht [50]. Die Erdung der Blitzfangstangen muss einen möglichst geringen Widerstand besitzen. Jedoch wurde in [121] die Schlussfolgerung gezogen, dass ein eigenständig geführtes Kupferkabel keinen Vorteil gegenüber der Erdung an der Struktur des Mastes besitzt. Wird die Energie des Blitzes über das Versorgungsnetz eingekoppelt, so wird diese über einen SPD abgeleitet.

Ein weiterer Effekt eines Blitzes ist die plötzliche Ausdehnung der Luft und somit die Erzeugung einer Druckwelle, welche Größen von 10 bis 20 Bar innerhalb weniger Zentimeter erreichen kann [122]. Dabei besteht eine Gefahr für das Barometer, welches solch großen Druckpegeln nicht standhalten kann. Sobald ein SPD auslöst, sollte das Barometer auf seine Messergebnisse überprüft und gegebenenfalls ausgetauscht werden.

Durch den starken Strom, welcher in die Erde abgeleitet wird, erhöht sich das Potential der Erde. Bei nicht korrekt geerdeten Geräten und Kabeln kann so ein Strom fließen, der das Gerät beschädigen kann. Aus diesem Grund muss auf eine Single Point Erdung und Verbindung aller Geräte geachtet werden, sodass alle Geräte dieselbe Potentialerhöhung erfahren und demnach keine Überschlüsse zustande kommen [123].

Abb. 5.32 zeigt das jährliche Auftreten eines Blitzeinschlages über 1 km² in Europa. Rund um den Standort kommt es zu ca. 0.4 bis 1.6 Blitzeinschlägen pro Quadratkilometer in einem Jahr. Dabei treten besonders in den Sommermonaten Mai bis August vermehrt Blitzeinschläge auf. Das Maximum am Standort wird im Mai mit bis zu 10 Einschlägen pro Quadratkilometer ermittelt [124].

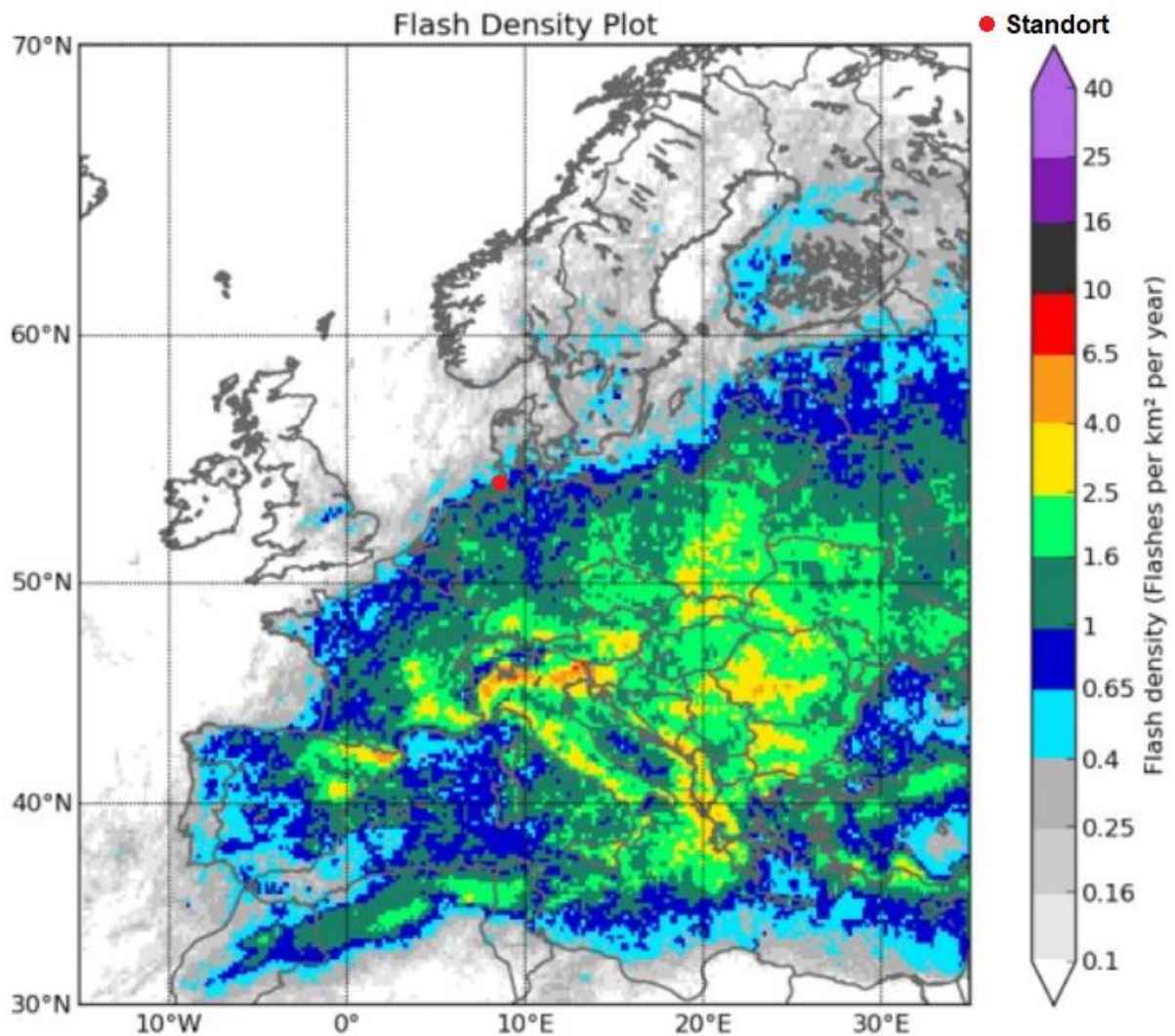


Abb. 5.32: Verteilung von Blitzeinschlägen in Europa jährlich gemittelt über die Jahre 2008 bis 2013 [124]

Da die WEAs und Messmasten das höchste Objekt auf einem offenen Feld darstellen, wird die Wahrscheinlichkeit eines Blitzeinschlages als hoch eingestuft. Daher müssen alle Blitzfangstangen und alle Sensoren mit der Maststruktur geerdet sowie alle Daten- und Stromleitungen geschirmt werden. Die Schirmung bewirkt eine Reduzierung der induzierten Spannung um einen Faktor von 20-100 [125]. Jedoch muss dieser an beiden Seiten aufgelegt sein.

5.2.3.5 Sonstige Umweltbedingungen

Weitere Möglichkeiten für eine Fehlerursache würde ein Erdbeben, ein Unwetter, ein wechselnder Temperaturzyklus oder ein Brand des Feldes darstellen.

Der Temperaturzyklus stellt keine Gefahr für die Geräte und Sensoren dar, da eine ausreichende Klimatisierung über Klimageräte und Heizungen erfolgt. Selbst bei einem Ausfall eines Klimagerätes sind jeweils zwei weitere Geräte funktionsfähig und eine konstante Temperatur kann sichergestellt werden.

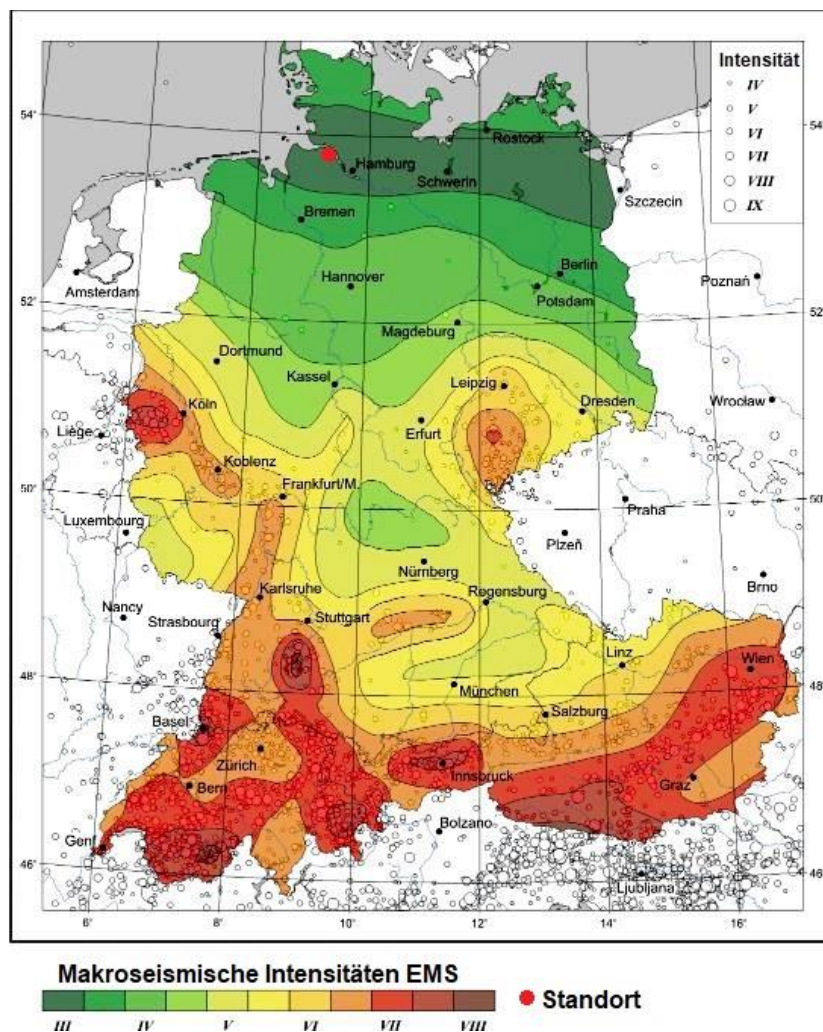


Abb. 5.33: Karte der Erdbebengefährdung in Deutschland [126]

Abb. 5.33 zeigt die Erbebengefährdung für Deutschland, in welcher der Standort mit der niedrigsten Bewertung von III ersichtlich ist. Nach [126] bedeutet Stufe III eine schwache Intensität, welche von ruhenden Personen als leichte Schwingung wahrgenommen wird. Für die Geräte des Schaltschranks und den Messmasten stellt diese leichte Schwingung keine Gefahr dar.

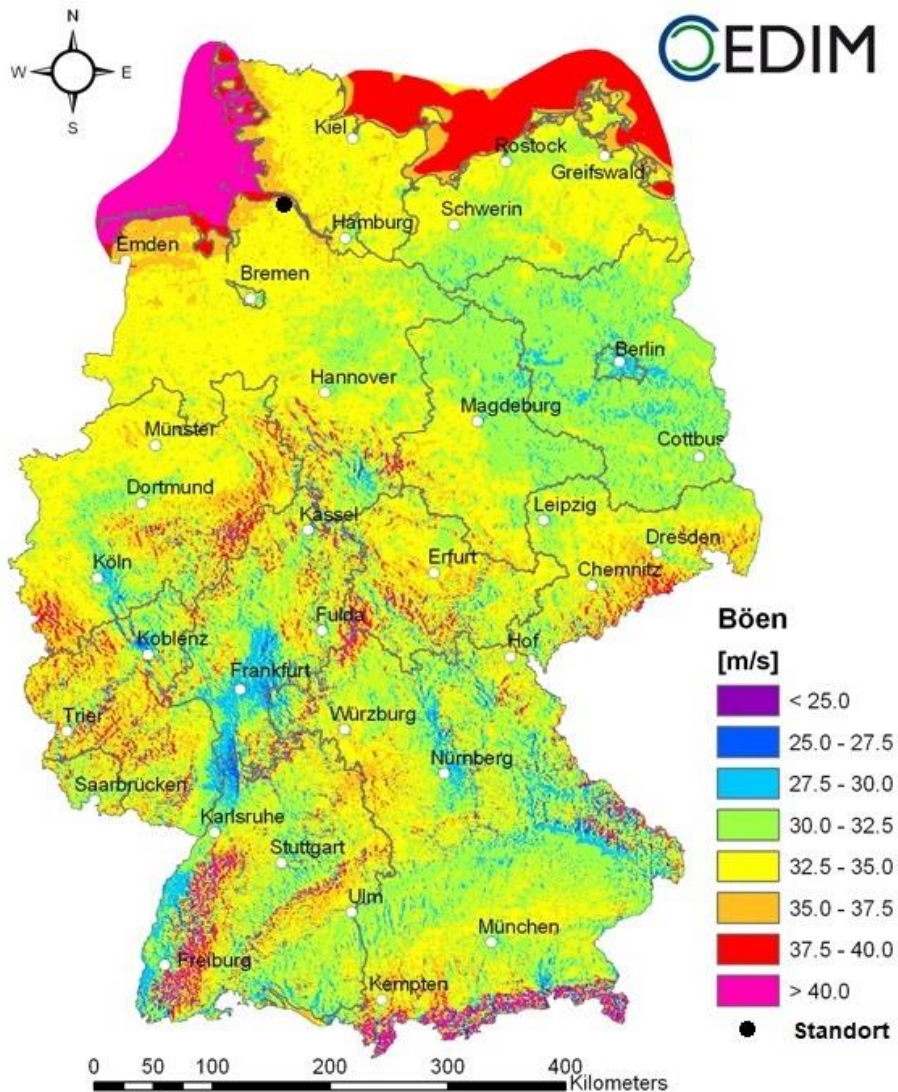


Abb. 5.34: Karte der maximalen Böengeschwindigkeiten in Deutschland [127]

Bei einem Unwetter kann es nicht nur zu starken Niederschlägen kommen, sondern es können auch starke Winde entstehen (siehe Abb. 5.34). Da die Schalensternanemometer bis zu 75 m/s bzw. 270 km/h und das USA bis zu 60 m/s bzw. 216 km/h messen können, wird ein Fehlerfall durch einen starken Wind als sehr unwahrscheinlich eingestuft. Dies gilt jedoch nur bei einer korrekten Montage. Genauso werden die anderen Sensoren bei einer korrekten Montage nicht durch einen direkten Windein-

fluss beschädigt. Erst durch herumwirbelnde Gegenstände oder Staub kann ein Sensor im unteren Bereich des Mastes getroffen werden. Abb. 5.34 zeigt eine maximale Böengeschwindigkeit von 37,5 m/s für den Standort an. Dabei zu beachten ist die zukünftige Veränderung der maximalen Windgeschwindigkeiten zu größeren Werten durch die Folgen des Klimawandels. Eine Gefahr wird für den Schaltschrank angesehen, da dieser abhängig von der Höhe des Schwerpunkts durch einen Windstoß umstürzen kann. Daher muss eine ausreichende Sicherung des Schaltschranks auf dem Boden z.B. mittels Schrauben vorgesehen werden.

Des Weiteren kann ein Feldbrand durch eine sehr trockene Landschaft ausgelöst werden. Repräsentativ kann die Waldbrandstatistik des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit verwendet werden (siehe Abb. 5.35 und Abb. 5.36).

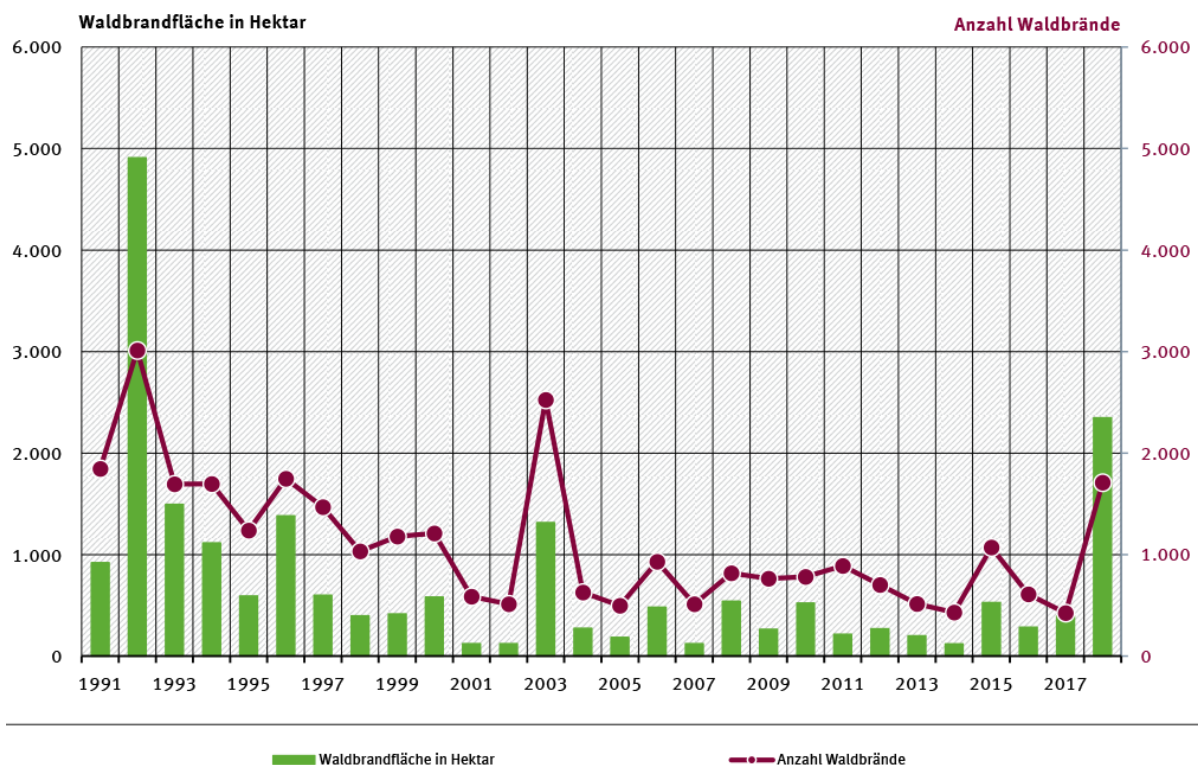


Abb. 5.35: Anzahl der Waldbrände und Schadensfläche in Deutschland von 1991 bis 2018 [128]

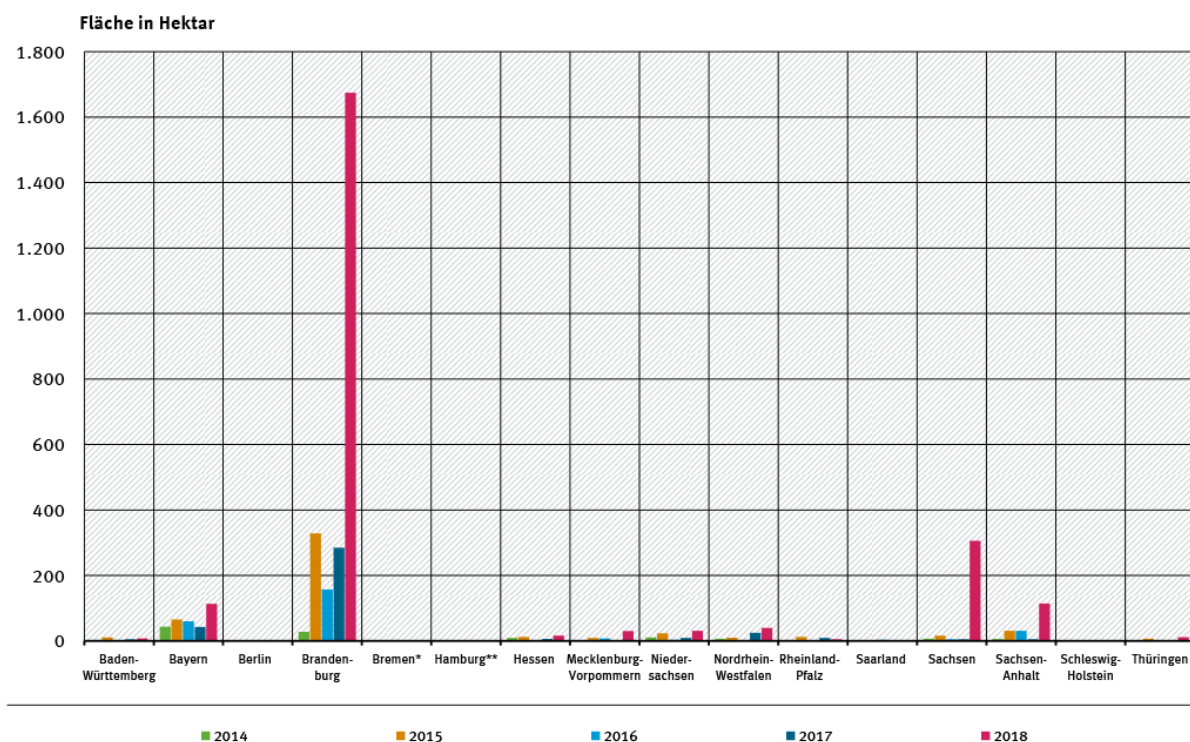


Abb. 5.36: Anzahl der Waldbrände in Deutschland nach Bundesländern [128]

So zeigt Abb. 5.35 die Anzahl der Waldbrände und deren Fläche in Deutschland auf. Allgemein ist eine Zunahme für das Jahr 2018 zu erkennen, obwohl ein Gesamttrend hin zu einer niedrigeren Anzahl seit 1991 zu verzeichnen ist. Dennoch kommt es immer wieder zu sehr trockenen Sommern, wie es im Jahr 2003 und 2018 der Fall war. Wird diese Statistik hinsichtlich der betroffenen Bundesländern ausgewertet, so fällt auf, dass Niedersachsen nur eine sehr geringe Anzahl an Waldbränden verzeichnet. Die Ursachen für einen Waldbrand für das Jahr 2018 sind in Tab. 5.6 aufgelistet.

Ursache	Anteil [%]
Unbekannt	48,9
Fahrlässigkeit	25,5
Vorsatz (Brandstiftung)	12,9
Sonstige Einwirkungen	7,9
Natürliche Ursachen	4,7

Tab. 5.6: Waldbrandursachen für das Jahr 2018 [128]

Zu erkennen ist eine große Anzahl an unbekannten Ursachen, sodass eine Abschätzung der Gefahr schwierig ist. Jedoch betreffen die zwei nächsten Ursachen ein menschliches Versagen wie das fahrlässige Wegwerfen einer Zigarette. Für den Standort lässt sich aus der Statistik und Tabelle ableiten, dass eine geringe Wahrscheinlichkeit für einen Brand angenommen werden muss.

Weiterhin stellen Tiere eine Gefahr für das System dar. Vögel können die Sensoren blockieren oder die Isolierung der Kabel aufpicken. Dies kann zu einem Kurzschluss führen. Weiterhin können die Kabel am Schaltschrank durch Nagetiere beschädigt werden. Aus diesem Grund sollten die Kabel in einem farblich unauffälligen Kanal geführt werden, der sowohl für Vögel als auch Nagetiere nicht zu durchdringen ist. Zusätzlich sollten die Kabel über den oberen Teil des Schaltschranks in das Innere geführt werden.

5.2.4 Quantifizierung der einzelnen Fehlerursachen

Eine genaue Quantifizierung aller Fehler lässt sich sehr schwer umsetzen, da nicht alle notwendigen Daten vorliegen. Auch müssen die bisher angegebenen Zahlenwerte der MTBF kritisch betrachtet werden, da es sich zumeist um Testszenarien handelt. Diese sind mit der Realität jedoch nur bedingt vergleichbar. Es können Stress-tests mit erhöhter Last (*Highly Accelerated Stress Test* HAST) und beschleunigtem Ausfall oder Hochrechnungen aus einzelnen MTBF-Werten der Komponenten durchgeführt werden. Dabei stellt die MTBF nur einen Erwartungswert dar, welcher je nach Auslastung und Verwendung des Gerätes höher oder niedriger liegen kann. Genau dies ist an der Argumentationsbasis des Unternehmens Metek erkennbar. Das USA besitzt nach Berechnungen und Auswertungen von Fehlerfällen eine MTBF von 657.000 Betriebsstunden. Rechnet man diese in einen simplen interpretierbaren Wert um, so ergeben sich rund 75 Jahre. Daher gibt Metek eine offizielle MTBF von 50.000 Stunden an, welche in etwa 5,7 Jahren entspricht. In diesem Fall konnten einzelne Fehlerfälle von Kunden ermittelt werden. Bei einem Großhersteller, wie es bei Computern der Fall ist, bleiben die Fehlerfälle der Kunden zumeist ungenannt und es wird sich auf Testszenarien oder Hochrechnungen gestützt. Die Berechnung aus einzelnen Komponenten ist jedoch abhängig von dem Alter der verwendeten Datenbasis. Aus diesen Gründen wird eine Art Rangliste für die häufigsten Ursachen eines Ausfalls erstellt. Dabei wird zunächst eine Anfangsphase betrachtet, in welcher

erste Erfahrungen mit dem System gemacht werden und dadurch eine zukünftige Vermeidung dieser Fehler erzielt werden kann (siehe Tab. 5.7). Die zweite Phase betrachtet hingegen das System mit seinen Fehlern auf eine langfristige Sicht (siehe Tab. 5.8).

Rang	Fehlerursache
1	Servicemitarbeiter (Montage, Bedienung usw.)
2	Software
3	Hardware
4	Umwelt
5	Außenstehende Personen (Landwirt, Hacker usw.)

Tab. 5.7: Rangliste der angenommenen Fehlerursachen in der Anfangsphase

Rang	Fehlerursache
1	Hardware
2	Software
3	Servicemitarbeiter (Montage, Bedienung usw.)
4	Umwelt
5	Außenstehende Personen (Landwirt, Hacker usw.)

Tab. 5.8: Rangliste der angenommenen Fehlerursachen auf langfristige Sicht

So wird als häufigste Fehlerquelle die Hardware zu einem Fehler führen. Je nach Auslastung des einzelnen Geräts wird ein Versagen darauf zurückzuführen sein. Deshalb wird auf ein Derating z.B. der Stromversorgungen geachtet oder auch ein zweiter *Random Access Memory* (RAM) im Steuer-PC verwendet. So ist die Verwendung von zwei 8 GB RAMs eines einzelnen 16 GB RAM zu bevorzugen. Auch wird das Speichermedium in einem besonderen Maß berücksichtigt. Zum einen wird über ein RAID1 System ein zweites Speichermedium beschrieben und zum anderen werden die Daten über ein USB-Speichermedium wiederholend manuell übertragen. Bei einem Ausfall einer Stromversorgungseinheit greift die USV ein und die Geräte können sicher heruntergefahren werden. Bei den Sensoren muss auf die Messdaten

geachtet werden und ein eventueller Vergleich mit einem Wetterbericht oder den Daten der anderen Masten durchgeführt werden.

Als zweithäufigste Fehlerquelle wird die Software bewertet. Diese kann nicht nur bei den Netzwerkkomponenten zu einem Fehlverhalten führen, sondern vor allem auf dem Steuer-PC sowie dem Messsystem zu einem Verlust von Daten oder Pausieren der Datenaufnahme führen. Im Fall eines Updates muss immer ein Kompromiss zwischen einem kurzzeitigen DoS oder einer Aufnahmepausierung der Messdaten und dem Nutzen des Updates geschlossen werden. Ein guter Zeitpunkt dafür wäre z. B. während einem Stillstand der WEAs oder anderweitige Zeiträume, bei welchem die Messwerte nicht von Interesse sind.

Der menschliche Aspekt wird als dritte Ursache eines Fehlers eingestuft. Dabei kann eine falsche Montage, ein Nichtreagieren auf Fehlermeldungen oder eine inkorrekte Bedienung eines Geräts ungewollte Ergebnisse erzielen. Da die Geräte nur ein einziges Mal montiert und nicht in ihrer Position verändert werden, sollten solche Fehler in den ersten Betriebstagen auffallen bzw. durch ein Vier-Augen-Prinzip direkt verhindert worden sein. Bei der Bedienung hingegen sollte sich der jeweilige Ingenieur vor dem eigentlichen Betrieb mit der Software der Geräte auseinandersetzen und eine eigene Anleitung für die wichtigsten Einstellungen in einem Fehlerfall verfassen. Da das System einmal angeschaltet nicht weiter durch einen Servicemitarbeiter verändert werden muss, wird dieser Faktor geringer als ein Ausfall einer Hard- und Softwarekomponente beurteilt. Als weitere Begründung kann ein Vergleich des aktuellen Systems mit den HPC-Systemen aus [70] durchgeführt werden.

Als vierte Fehlerquelle wird die Umwelt erachtet. Trotz einer Behausung aller Geräte in einem Schaltschrank und Sicherheitsmaßnahmen gegen z. B. Blitzeinschläge kann die Umwelt Energien in Form von Wind, Elektrizität, Feuer, Eis und Wasser generieren, welche diese Maßnahmen zunichtemachen. Aufgrund der weitreichenden Folgen des Klimawandels wird die Wahrscheinlichkeit für solch einen Fehlerfall größer werden und es müssen eventuell Nachrüstungen vorgenommen werden. So wird beispielsweise der Deich in der Nähe des Standorts in den nächsten Jahren erhöht.

Als letzte Ursache eines Fehlers wird der Eingriff durch unbefugte Menschen bewertet. Diese können Beschädigungen hervorrufen, die Daten manipulieren bzw. das Netzwerk infiltrieren oder auch unbeabsichtigt einen Schaden verursachen. Dagegen schützen der Schaltschrank vor einem direkten und eine Firewall vor einem indirek-

ten Zugang zu dem Gesamtsystem. Der Messmast muss entsprechend Warnschilder und eine nur mit Hilfsmitteln begehbare Steigleiter besitzen.

Ein wichtiges Kriterium für eine ausreichend hohe Lebenserwartung aller Geräte und Sensoren bedingt eine regelmäßige Wartung. Diese sollte mindestens einmal jährlich durchgeführt werden und wurde in Kapitel 5.1 für jedes Gerät im Einzelnen beschrieben.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Feinkonzept einer Datentechnik für einen meteorologischen Messmasten mit dem Ziel einer hohen Verfügbarkeit erarbeitet. Dabei wurde der Hintergrund des Projektes kurz illustriert und eine Zusammensetzung sowie Eingrenzung der notwendigen Datentechnik erzielt.

Weiterhin wurde der Aspekt der Fehlertoleranz behandelt und das erarbeitete Konzept auf diese mittels einer FMEA, Fehlerbaumanalyse und diversen Literaturquellen untersucht. Daraus wurde eine Betrachtung aller Geräte im Einzelnen sowie in einem zweiten Schritt die Analyse hinsichtlich technischer und menschlicher Fehler sowie Ursachen, welche auf die Umwelt zurückzuführen sind, durchgeführt.

So weist das Konzept gewisse Fehlerquellen auf, für welche mittels Überwachungssystemen, Schutzvorrichtungen und regelmäßigen Kontrollen eine Optimierung hinsichtlich des Auftretens und der Detektion der Fehler erreicht werden kann. Als Hauptursache wird die Hardware aller Geräte auf eine langfristige Sicht identifiziert. Diese erfährt abhängig von der Auslastung und den Umweltbedingungen einen unterschiedlichen Alterungsprozess. Fehler, welche beispielsweise auf die Montage oder eigene Programmierung von Software zurückzuführen sind, werden in den ersten Monaten des Betriebs beseitigt, sodass im späteren Verlauf des Projektes diese Fehler immer seltener auftreten. Weiterhin wird als meistauftretende Fehlerquelle, die auf die Umwelt zurückzuführen ist, ein Blitzeinschlag erachtet.

Mit dem Abschluss dieser Arbeit werden zunächst alle Geräte beschafft und im Einzelnen sowie später im Systemverbund einem Test unterzogen. Auch müssen eigene Programme für die Überwachungsgeräte entwickelt werden, wie es beispielsweise der PFC100-Controller ist. Im späteren realen Betrieb auf dem Messmasten und in dem Schaltschrank kann eine genauere Betrachtung des Fehlverhaltens, eine Dokumentation der aufgetretenen Fehler sowie eine Einordnung in eine Fehlerkategorie erarbeitet werden. Daraus muss ein Lernprozess entstehen, sodass diese Fehler verhindert werden können. Weiterhin kann die Erwartung, welche durch diese Arbeit ermittelt wurde, mit der Realität verglichen und für zukünftige Projekte genutzt werden.

A Verzeichnisse

A.1 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. „Energiedaten: Gesamtausgabe“. Oktober 2019
- [2] Forschungsverbund Windenergie. „Vorhabenbeschreibung“. September 2014
- [3] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. „DFWind Deutsche Forschungsplattform für Windenergie“. Präsentation. Juli 2017
- [4] K. Alvermann, S. Graeber, M. Jessen, H. Oertel, M. Schubert. „Technisches Konzept - Hauptschaltschrank und IEC-Messtechnik für den IECplus-Messmasten im DFWind Forschungswindpark“. April 2020
- [5] J. Warda, T. Blonsky. „Konzeptionierung und Aufbau eines Schaltschranks für Mess- und Datentechnik“. März 2020
- [6] B. W. Johnson. „Design and Analysis of Fault Tolerant Digital Systems“. 1989
- [7] S. Montenegro. „Sichere und fehlertolerante Steuerungen“. 1999
- [8] C. Werner. „Verteilte Systeme 7. Fehlertoleranz“ Vorlesungsskript der TU Braunschweig. 2011.
- [9] B. Ostheimer, A. Schwickert, F. Schreiber. „Mean Time Between Failures: Grundlagen, Konzept, Methoden, Werkzeuge“ 2013
- [10] DIN Deutsches Institut für Normung. „DIN 40041, Zuverlässigkeit; Begriffe“. Dezember 1990
- [11] Deutsche Kommission Elektrotechnik. „Internationales elektrotechnisches Wörterbuch, 192 Zuverlässigkeit“. Mai 2016
- [12] Atlassian Corporation Plc. „MTBF, MTTR, MTTA and MTTF Understanding a few of the most common incident metrics“. <https://www.atlassian.com/incident-management/kpis/common-metrics> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [13] N. Trümmel. „Verlässlichkeitssteigerung elektrischer Antriebe am Beispiel der elektromechanische Servolenkung“. 2018
- [14] R. Büse. „Fehlertolerante, sicherheitskritische Systeme“. Vorlesungsskript DHBW Ravensburg. 2017

- [15] J. Thode. „Risikoanalyse-Tools: Fehlerbaumanalyse (FTA)“. Blog.
<http://www.mpl.loesungsfabrik.de/blog/iso-13485/fehlerbaumanalyse> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [16] U. Fräbel, Philotech Academy. „Safety Assesment nach ARP4754A und Entwicklung flugkritischer Systeme“. Fortbildungsskript. 2020
- [17] Department of Defense, United States of America. “Military Handbook - Electronic Reliability Design Handbook”. MIL-HDBK338B. 01. Oktober 1998
- [18] J. Thode. „Die FMEA als Technik zur Risikoanalyse“. Blog.
<http://www.mpl.loesungsfabrik.de/blog/iso-13485/fmea> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [19] Department of Defense, United States of America. „Military Standard - Procedures for performing a Failure Mode, Effects and Critically Analysis”. MIL-STD-1629A. 24. Oktober 1980
- [20] Imc Test & Measurement GmbH. „imc BUSDAQflex Handbuch“. Oktober 2018
- [21] Imc Test & Measurement GmbH. „imc CANSASflex-CI8“. Januar 2019
- [22] S. Scholz. „Inbetriebnahme eines Sensors zur Durchführung meteorologischer Messungen“. September 2019
- [23] METEK Meteorologische Messtechnik GmbH. „3D Ultrasonic Anemometer uSonic-3 Cage MP – Manual“. Dezember 2018
- [24] M. Schubert. „FMEA des IECplus-Messmastes für DFWind“. Juli 2020
- [25] M. Schubert. „FTA des IECplus-Messmastes für DFWind“. Juli 2020
- [26] 1&1 IONOS SE. „Hardware-Firewall – das externe Sicherungssystem“. Blog. Juni 2016. <https://www.ionos.de/digitalguide/server/sicherheit/hardware-firewall-die-stabilere-firewall-loesung/> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [27] R. N. Smith, S. Bhattacharya. „Fault and Leak Tolerance in Firewall Engineering“. 1998
- [28] M. Roth. Persönliches Gespräch. Juni 2020.
- [29] J. Staggs. „Adventure in Attacking Wind Farm Control Networks“. Blackhat USA Konferenz. Präsentation. 2017
- [30] 1&1 IONOS SE. „DDoS und DoS – Angriffsmuster und Gegenmaßnahmen“. Blog. Aug. 2018. <https://www.ionos.de/digitalguide/server/knowhow/dos-und-ddos-angriffsmuster-im-ueberblick/> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [31] R. N. Smith, Y. Chen, S. Bhattacharya. „Cascade of Distributed and Cooperating Firewalls in a Secure Data Network“. September 2003

- [32] T. Finin, R. Fitzson, D. McKay, R. McEntire. „KQML as an Agent Communication Language”. November 1994
- [33] H. Wennerström et al. „A Long-Term Study of Correlations between Meteorological Conditions and 802.15.4 Link Performance” 2013
- [34] Telefonica Germany GmbH & Co. OHG „O₂ Netzabdeckung”. <https://www.o2online.de/service/netzabdeckung/> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [35] Telekom Deutschland GmbH. „Telekom Netzausbau”. <https://www.telekom.de/start/netzausbau> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [36] Vodafone GmbH. „Netzabdeckung: So gut ist unser Netz”. <https://www.vodafone.de/hilfe/netzabdeckung.html> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [37] Welotec GmbH. „TK800 Serie – Quick Start Guide”. 2020
- [38] Z. H. Trade. „Top 9 Reasons for Network Switches Failure”. Blog. <https://linknewnet.com/blog/9-reasons-for-network-switches-failure.html> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [39] 1&1 IONOS SE. „ARP-Spoofing – Schwachstelle in der Netzwerksicherheit” Blog. <https://www.ionos.de/digitalguide/server/sicherheit/arp-spoofing-angriffe-aus-dem-internen-netzwerk/> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [40] Meinberg Funkuhren GmbH & Co. KG. „Test Report Reliability Prediction – MTBF LANTIME M100/GPS”. Juni 2020
- [41] Wikipedia. „GPS signals”. Blog. https://en.wikipedia.org/wiki/GPS_signals (aufgerufen: 03.08.2020)
- [42] Inside GNSS Media & Research LLC. „Lessons to be Learned from Galileo Signal Outage”. <https://insidegnss.com/lessons-to-be-learned-from-galileo-signal-outage/> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [43] MOXA Inc. „Moxa Managed Ethernet Switch (UI_2.0_FW_5.x) User’s Manual”. April 2019
- [44] Meinberg Funkuhren GmbH & Co. KG. „Oszillator Optionen”. Juli 2017
- [45] EMQ Filtertechnik GmbH. „Filterklassen gemäß EN 779 und EN 1822”. Blog. <https://www.emw.de/de/filter-campus/filterklassen.html> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [46] National Electrical Manufacturers Association. „NEMA Enclosure Types”. 2003
- [47] Rittal GmbH & Co. KG. „MTBF /MTTR Rittal TopTherm cooling units”. April 2011

- [48] Rittal GmbH & Co. KG. „Rittal – The System UL Type 12/3R/4 Kühlgerät“. Bedienungsanleitung. Juli 2019.
- [49] S. Pindado et al. „On the Analytical Approach to Present Engineering Problems: Photovoltaic Systems Behavior, Wind Speed Sensor Performance and High-Speed Train Pressure Wave Effects in Tunnels“. Juni 2015
- [50] R.S. Hunter, B. Maribo Pedersen, T.F. Pedersen. “Recommended practices for wind turbine testing and evaluation. 11. Wind speed measurements and use of cup anemometry” 2003
- [51] Adolf Thies GmbH & Co. KG. „Bedienungsanleitung Windgeber First Class Advanced“. Januar 2009
- [52] Adolf Thies GmbH & Co. KG. „Bedienungsanleitung Hygro-Thermogeber-compact“. Juni 2018
- [53] Adolf Thies GmbH & Co. KG. „Instruction for Use Baro Transmitter“. Juli 2011
- [54] A.S. Morris, R. Langari. „Measurement and Instrumentation“. 2016
- [55] Adolf Thies GmbH & Co. KG. „Instructions for Use Precipitation Sensor“. November 2009
- [56] V. Seyfang et al. „Studie zum wissenschaftlichen Erkenntnisstand über das Allergiepotential von Pollenflug der Gehölze im öffentlichen Grün der Städte und Gemeinden und mögliche Minderungsstrategien“. August 2008
- [57] K. Schubotz, H. Dörschel, E. Lanzinger, M. Theel. „Examination of different versions of bird repelling techniques for ultrasonic anemometer“. 2014
- [58] M. Lueck, J. Radke, J. Bade. „uSonic DLR Fragen“. E-Mail-Verkehr. Juli 2020
- [59] B. Schroeder, G. A. Gibson. „Disk failures in the real world: What does an MTTF of 1,000,000 hours mean to you?“. Februar 2007
- [60] N.Talaga, D. Patterson. „An analysis of error behavior in a large storage system“. 1999
- [61] C. van Ingen, J. Gray. „Empirical measurements of disk failure rates and error rates“. 2005
- [62] T. Schwarz, M. Baker, S. Bassi. „Disk failure investigation at the internet archive“. 2006
- [63] S. Luber, A. Donner. „Was ist TLC Flash?“. Blog. <https://www.storage-insider.de/was-ist-tlc-flash-a-788767/> (aufgerufen: 03.08.2020)

- [64] C. Kübler. „Die SSD-FAQ: Aktuelle SSD-Technologien im Überblick“. Blog. <https://www.hardwareluxx.de/index.php/artikel/hardware/storage/49953-die-ssd-faq-aktuelle-ssd-technologien-im-ueberblick.html?start=3> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [65] MyDigitalDiscount. „Everything you need to know about SLC, MLC & TLC NAND Flash“. Blog. <https://www.mydigitaldiscount.com/everything-you-need-to-know-about-slc-mlc-and-tlc-nand-flash.html#SSD-Life-Cycle> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [66] Q. Li, H. Li, K. Zhang. „A Survey of SSD Lifecycle Prediction“. Oktober 2019
- [67] B. Schroeder, R. Lagisetty, A. Merchant. „Flash Reliability in Production: The Expected and the Unexpected“. Februar 2016
- [68] R. Graefen. „Was ist RAID? (Alles über Level 1 bis 5 und mehr)“. Blog. <https://www.storage-insider.de/was-ist-raid-alles-ueber-level-1-bis-5-und-mehr-a-517806/> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [69] I. R. Walker. „Reliability in Scientific Research – Improving the Dependability of Measurements, Calculations, Equipment and Software“. 2011
- [70] B. Schroeder, G. A. Gibson. „A large-scale study of failures in high-performance computing systems“. Juni 2006
- [71] J. Barath. „Optimizing Windows 10 logging to detect network security threats“. 2017
- [72] C. dos Santos, R. Matias. „Failure Patterns in Operating Systems: An Exploratory and Observational Study“. April 2017
- [73] Imc Test & Measurement GmbH. „imc Studio 5.2 Handbuch“. Juni 2019
- [74] Phoenix Contact GmbH & Co. KG. „The basics of surge protection“. 2016
- [75] A. Mansoor, F. Martzloff. „The Dilemma of Surge Protection vs. Overvoltage Scenarios: Implications for Low-Voltage Surge-Protective Devices“. Oktober 1998
- [76] EVU – Messtechnik. „Die Netzqualitätskriterien nach EN 50160“. 2015.
- [77] Cadex Electronics Inc. „BU-804b: Sulfation and Ho to Prevent it“. Blog. https://batteryuniversity.com/learn/article/sulfation_and_how_to_prevent_it (aufgerufen: 03.08.2020)

- [78] Cadex Electronics Inc. „BU-804a: Corrosion, Shedding and Internal Short“. Blog. https://batteryuniversity.com/learn/article/corrosion_shedding_and_internal_short (aufgerufen: 03.08.2020)
- [79] Eaton Corporation. „The large UPS battery handbook“. 2020
- [80] L. Yanyan, M. Fanbin. „Study on the Reliability Test of Automotive Relays under Temperature Cycling Condition“. 2012
- [81] Pickering Interface GmbH. „Relay Reliability“. Blog. <https://www.pickeringtest.com/de-de/kb/hardware-topics/relay-reliability> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [82] X. Zhang et al. „Effect of Electrical Load on Contact Welding Failure of Silver Tin Oxide Material Used in DC Electromechanical Relays“. September 2019
- [83] Keithley Instruments Inc. „Switching Handbook – A Guide to Signal Switching in Automated Test Systems“. 6th Edition 2008
- [84] Assembly Magazine. „Switches & Relays: Cut the Chatter“. <https://www.assemblymag.com/articles/94876-switches-relays-cut-the-chatter> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [85] Hartland Controls. „The difference between contact chatter & contact bounce“. <https://hartlandcontrols.com/blog/the-difference-between-contact-chatter-contact-bounce/> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [86] P. D. Jaeger, W. van Gils. „Reliability comparison of RJ45 and Mini I/O“. Blog. <https://www.eurocircuits.com/blog/white-paper-reliability-comparison-of-rj45-and-mini-io/> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [87] McGarry and Madsen Inspection. „What is the average life expectancy of an electrical receptacle outlet?“. <https://www.howtolookatahouse.com/Blog/Entries/2019/12/what-is-the-average-life-expectancy-of-an-electrical-receptacle-outlet.html> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [88] Acton Media Inc. „Solved! What to Do If an Electrical Outlet Isn't Working“. Blog. <https://www.bobvila.com/articles/electrical-outlet-not-working/> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [89] Renesas Electronic Corporation. „RS-422 vs RS-485 Similarities and Key Differences“. Dezember 2017
- [90] Maxim Integrated Products Inc. „RS-485: Still the Most Robust Communication“. 2017

- [91] PC Dreams. „Why SFP Transceivers stop working and their possible troubleshooting guide“. Blog. <https://pcdreams.com.sg/why-sfp-transceivers-stop-working-and-their-possible-troubleshooting-guide/> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [92] Reach Optics Technology Co. „What are the important causes of the failure of the SFP optical module?“. Blog. <http://www.reachoptics.com/what-are-the-important-causes-of-the-failure-of-the-sfp-optical-module-n105.html> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [93] Anritsu Corporation. „Why do I need to inspect and/or clean fiber in optical BBU/RRH link“. Dezember 2016
- [94] S. Nagel. „Reliability Issues In Optical Fibers“. Februar 1987
- [95] P. van Vickel. „Optical Fiber Cable Design & Reliability“. 2014
- [96] Corning Inc. „Frequently Asked Questions on Fiber Reliability“. April 2016
- [97] CONEC Elektronische Bauelemente GmbH. „Fiber Optic Connectors“.
- [98] WAGO Kontakttechnik GmbH & Co. KG. „The Wago Cage Clamp Technology“.
- [99] D. Doebel. „Widerstandsklassen – Einbruchhemmende Bauteile nach DIN EN 1627“. Blog. <https://www.einbruchschutz-fenster.de/widerstandsklassen/> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [100] J. A. Gillies et al. „Effect of vehicle characteristics on unpaved road dust emission“. April 2005
- [101] D. Goosens, B. Buck. „Dynamics of Dust Clouds Produced by Off-road Vehicle Driving“. Jan 2014
- [102] Wochenblatt-Verlag Schrader GmbH & Co. KG, T. Penz. „Forschungsplattform statt Rekord-Windspargel“. https://www.kreiszeitung-wochenblatt.de/nordkehdingen/c-politik/forschungsplattform-statt-rekord-windspargel_a58969 (aufgerufen: 03.08.2020)
- [103] Proplanta GmbH & Co. Kg. „Windkraftanlagen – Standorte von Windrädern, Windparks und Windkraftanlagen in Deutschland“. Blog. https://www.proplanta.de/Maps/Windkraftanlagen_points1404907272.html (aufgerufen: 03.08.2020)
- [104] Fachagentur Windenergie an Land. „Überblick zu den Abstandsempfehlungen zur Ausweisung von Windenergiegebieten in den Bundesländern“. Februar 2020

- [105] Bundesministerium des Innern der Bundesrepublik Deutschland. „Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm“. August 1998
- [106] Medienverbund Nürnberger Land GmbH & Co. KG. „Kommen hohe Strommasten durch die Hintertür?“. Februar 2017
- [107] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. „Auswahl und Benutzung von Steigleitern“. Oktober 2018
- [108] J. Poma. „Salt Air: How far inland does salty air affect metals?“. Juli 2018
- [109] K. Slamova, R. Glaser. „Mapping atmospheric corrosion in coastal regions: methods and results“. Juni 2012
- [110] W. Wiederholt. „Korrosion und Korrosionsschutz von Geräten und Maschinen in der Landwirtschaft“. 1973
- [111] X. Wun et al. „Study on the Corrosion of Duplex Stainless Steel Bar“. 2016
- [112] Projektbüro Fahrrinnenanpassung beim Wasser- und Schiffsahrtsamt Hamburg. „Hochwasserschutz an der Unterelbe“. August 2006
- [113] Süddeutsche Zeitung Digitale Medien GmbH. „Klimawandel macht höhere Deiche an der Unterelbe nötig“. August 2019
- [114] Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz. „Tideelbe Blatt03 HWGK L“. Dezember 2013
- [115] Deutscher Wetterdienst. „Unwetterklimatologie: Hagel“. Blog.
https://www.dwd.de/DE/leistungen/unwetterklima/hagel/hagel_node.html (aufgerufen: 03.08.2020)
- [116] Deutscher Wetterdienst. „Wetterlexikon: Hagel“. Blog.
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=101094&lv3=101150> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [117] B. Rook. „The cold, hard truth about ice on turbine blades“. Blog.
<https://www.windpowerengineering.com/the-cold-hard-truth-about-ice-on-turbine-blades/> (aufgerufen: 03.08.2020)
- [118] E. Sunden, L. Makkonen. „Ice Loads on a Lattice Tower Estimated by Weather Station Data“. Mai 1998
- [119] T. Hahm, N. Stoffels. „Ice Throw Hazard Experiences and Recent developments in Germany“. 2016

- [120] Y. Goda et al. „Melting and Breaking Characteristics of OPGW Strands by Lightning“. Oktober 2004
- [121] C. Gomes, A. Galvan. „Lightning protection scenarios of communication tower sites; human hazards and equipment damage“. Dezember 2011
- [122] R. Blumenthal, N. West. „Investigating the risk of lightning’s pressure blast wave“. August 2014
- [123] LPGL & Affiliates ,The Lightning Protection Experts‘. „Recommended Guide For The Protection Of Equipment & Personnel From Lightning“. 2018
- [124] G. Anderson, D. Klugmann. „A European lightning density analysis using 6 years of ATDnet data“. März 2014
- [125] S. Haigh et al. „Recommended Practices For Wind Turbine Testing – 9. Lightning Protection For Wind Turbine Installations“. 1997
- [126] G. Grünthal, D. Mayer-Rosa, W. Lenhardt. „Abschätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH-Staaten – Deutschland, Österreich, Schweiz“. 1998
- [127] T. Hofherr, M. Kunz. „Extreme wind climatology of winter storms in Germany“. 2010
- [128] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. „Waldbrände“. Blog. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/landforstwirtschaft/waldbraende#waldbrande-in-deutschland> (aufgerufen: 03.08.2020)

A.2 Abbildungsverzeichnis

2.1	Konzept des Standortes mit zwei WEAs, vier Messmasten und dem DMC	5
2.2	Konzept der Sensorik auf dem IECplus-Masten des Instituts für Flugsystem- technik des DLR	7
2.3	Aufteilung des Hauptschaltchranks	8
2.4	Geräteverteilung des Hauptschaltchranks inklusive Stromleitungen.....	10
2.5	Geräteverteilung des Hauptschaltchranks inklusive Netzwerkverbindungen ..	11
3.1	Indirekte Redundanz über eine Schätzung bei einem Sensorausfall.....	17
3.2	Verlauf der Ausfallrate über der Zeit.....	20
3.3	Zusammenhänge der einzelnen mittleren Zeiten.....	22
3.4	Fehlerfortpflanzung	25
3.5	Fehlerbaumanalyse am Fallbeispiel eines Hochauftriebssystems in einem Luft- fahrzeug.....	27
3.6	Top-Down- und Bottom-Up-Ansatz für eine Realisierung einer Fehleranalyse .	32
4.1	Messsystem imc BUSDAQflex und Messmodul CANSASflex-CI8	35
4.2	Versuchsaufbau einer Testmessung des USA in einer realen Umgebung (inne- rer aufbau)	39
4.3	Versuchsaufbau einer Testmessung des USA in einer realen Umgebung (äuße- rer Aufbau).....	40
4.4	USA Langzeitmessung der Windgeschwindigkeit in X-Richtung	41
4.5	USA Langzeitmessung der Windgeschwindigkeit in Y-Richtung	41
4.6	USA Langzeitmessung der Windgeschwindigkeit in Z-Richtung.....	42
5.1	Netzabdeckung der Telefonica Germany für 2G EDGE und 4G LTE mit dem Standort des Messmastes.....	47
5.2	Netzabdeckung der Deutschen Telekom für 2G EDGE und 4G LTE mit dem Standort des Messmastes.....	48
5.3	Netzabdeckung der Vodafone für 2G EDGE und 4G LTE mit dem Standort des Messmastes.....	48
5.4	Schalensternanemometer mit einer abgebrochenen Schale	57
5.5	Niederschlagssensor des Unternehmens Thies	60
5.6	Ultraschallanemometer uSonic-3 Cage MP des Unternehmens Metek	61
5.7	Vogel auf einem 2D-Ultraschallanemometer.....	62
5.8	Beschädigte Sensormembran und herausgezupfte Sonotrode.....	63
5.9	Lebenszyklusfehler für HDDs.....	67
5.10	ARR von HDDs eines bestimmten HPC-Systems (HPC1) in Jahren und Mona- ten.....	68
5.11	Einteilung der Fehler in Kategorien bei den Prozessortypen D bis H und allen Systemen zusammen.....	72
5.12	Prozentualer Anteil der Ausfallzeiten der Prozessortypen D bis H und aller Sys- teme durch die einzelnen Fehlerursachen.....	73
5.13	Verteilung der Fehleranzahl über einen Tag und einer Woche.....	74
5.14	Funktionsweise eines SPD über einen Kurzschluss (links) und einer Ableitung zur Erdung	79
5.15	Abhängigkeit der Lebensdauer eines VRLA-Akkumulators und eines Lithium- ionen-Akkumulators von der Temperatur	83

5.16	Korrosion der Elektrodenplatten eines Blei-Säure-Akkumulators	84
5.17	Änderung der Kontaktoberfläche eines Relais nach 25.764 „Hot Switching“ Schaltzyklen.....	86
5.18	Änderung der Kontaktoberfläche eines Relais nach 242.913 „Hot Switching“ Schaltzyklen.....	86
5.19	RJ45 Änderung des Kontaktwiderstands nach Steck-, Umwelt- und Vibrations- tests.....	91
5.20	RJ45 Testergebnisse bezogen auf die Anzahl der Verbindungsunterbrechungen (20 ns Länge) nach Steck- und Umwelttests und während des Vibrationstests....	91
5.21	Schwarze Farbänderung durch einen Kurzschluss einer NEMA-Steckdose.....	93
5.22	Windparks in der Nähe des Standorts.....	101
5.23	Standort für DFWind mit dem Windpark Breitendeich (vorne), der Stadt Oeder- quart (hinter Breitendeich), dem Windpark Wechtern (mittig links) und der Elbe	101
5.24	Steigleiter nur mit einer externen Leiter erreichbar und Steigleiter durch einen abnehmbaren Schutz erreichbar	104
5.25	Deich nördlich des Standorts	107
5.26	Hagelschaden an einem Autodach.....	107
5.27	Eisbildung an einem Rotorblatt einer WEA.....	108
5.28	Anzahl der Tage in Deutschland, an welchen sich Eis ausbilden kann, für Hö- hen bis 700 m kalkuliert	109
5.29	Verteilung des Eises bei einem Abbrechen an einer WEA ohne Berücksichti- gung des Terraineinflusses	110
5.30	Verteilung der Eisabbrüche für einen Fall und einen Wurf durch die Rotation der Rotorblätter in nicht komplexem Gebiet	111
5.31	Schmelzen eines Leiters durch einen Blitzeinschlag	112
5.32	Verteilung von Blitzeinschlägen in Europa jährlich gemittelt über die Jahre 2008 bis 2013	113
5.33	Karte der Erdbebengefährdung in Deutschland	114
5.34	Karte der maximalen Böengeschwindigkeiten in Deutschland.....	115
5.35	Anzahl der Waldbrände und Schadensfläche in Deutschland von 1991 bis 2018	116
5.36	Anzahl der Waldbrände in Deutschland nach Bundesländern	117
5.37	Karte der Erdbebengefährdung in Deutschland	114

A.3 Tabellenverzeichnis

2.1	WAGO Komponenten für eine Netzwerksteuerung der Relais, Netzteile und USV	14
3.1	Unterteilung der RPN in Abschnitte.....	30
4.1	Sensoren mit zugehörigen Messbereichen und der Steckerposition am Messsystem	36
5.1	MTBF und Ausfallwahrscheinlichkeiten zu Komponenten des NTP-Servers	52
5.2	MTBF und Ausfallwahrscheinlichkeiten zu Komponenten der Kühlgeräte	55
5.3	MTBF und Ausfallwahrscheinlichkeiten der Sensoren.....	65
5.4	MTBF und Ausfallwahrscheinlichkeiten des Messsystems.....	77
5.5	MTBF und Ausfallwahrscheinlichkeiten der SPDs.....	78
5.6	Waldbrandursachen für das Jahr 2018	117
5.7	Rangliste der angenommenen Fehlerursachen in der Anfangsphase	119
5.8	Rangliste der angenommenen Fehlerursachen auf langfristige Sicht.....	119

A.4 FMEA des IECplus-Messmastes für DFWind

Erklärung:	Dieses Dokument dient dazu, die Geräte und Sensoren, welche für den Betrieb des einzelnen IECplus-Messmastes notwendig sind, auf einzelne Fehler zu analysieren und mittels einer RPN auf eine unentdeckte Fehleranfälligkeit zu untersuchen.				
Abkürzungen:	RPN - Risk Priority Number				
	SPD - Surge Protection Device (Überspannungsschutz)				
	SW - Software				
	USV - Unterbrechungsfreie Stromversorgung				
Zahlenwerte für die Berechnung der RPN wurden mittels des MIL-HDBK-338B ermittelt!					
Bauteilkennung			Funktion	Potentieller Fehlerfall	Fehlermechanismus
Unternehmen	Gerät	Gerätekomponenten			
Rittal	Schaltschrank	Allgemein	Geräte vor Witterung und Vandalismus schützen	Kein Schutz vor Witterung	Vandalismus; Landwirt fährt mit Traktor dagegen
	Schaltschrank	Allgemein	Geräte vor Witterung und Vandalismus schützen	Umkippen	Starker Wind in Kombination mit einem zu hochgelegenen Schwerpunkt; Fehlerhafte Befestigung
	Wandanbau-Kühlgerät TopTherm Blue e, UL Type 3R/4 – SK 3305.508	Allgemein	Kühlung der Innenluft des Schaltschranks	Keine Kühlung	Gerät defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (10°C - 60°C); Wasserschaden
		Allgemein	Kühlung der Innenluft des Schaltschranks	Betrieb bei einer zu hohen/niedrigen Außen-/Schaltschranktemperatur (10°C - 60°C)	Umgebungstemperatur zu hoch/niedrig Schaltschranktemperatur zu hoch
		Controller - Thermostat	Korrekte Messung der Temperatur außerhalb des Kühlgerätes	Falsche oder keine Temperaturermittlung	Defekter Sensor
		Verdichter	Kühlmittel verdichten und kondensieren	Variabler Abstand zwischen Schraubenrotoren	Schock- oder Vibrationsbelastung
		Verdichter	Kühlmittel verdichten und kondensieren	Kontamination zwischen den Rotoren	Operation mit kontaminierten Kühlmittel (z.B. säurehaltig)
		Verdichter	Kühlmittel verdichten und kondensieren	Verlust des Schmieröls zwischen den Rotoren	Schmiermittelverlust, verschlissene Rotoren
		Verdichter	Kühlmittel verdichten und kondensieren	Druckzunahme zu gering	Verschlissene, zu langsam drehende Rotoren
		Verdichter	Kühlmittel verdichten und kondensieren	Druckzunahme zu groß	Zu schnell drehende Rotoren
		Controller - Pressostat	Korrekte Messung des Drucks nach dem Verdichter	Falsche oder keine Druckermittlung	Defekter Sensor
		Verflüssigerventilator	Luftzirkulation zum Wärmeaustausch nach Verdichter	Luftzufluss kleiner als benötigt	Zu langsames Drehen des Ventilators
		Verflüssigerventilator	Luftzirkulation zum Wärmeaustausch nach Verdichter	Luftzufluss kleiner als benötigt	Nichtanlaufen des Ventilators
		Verflüssigerventilator	Luftzirkulation zum Wärmeaustausch nach Verdichter	Luftzufluss größer als benötigt	Zu schnelles Drehen des Ventilators

Auftreten (1-10)	Fehlereffekte			Bedeutung (1-10)	Detektionsmethode	Detektion (1-10)	Kompensationsmethode
	Lokal	Nächst höheres Level	Endeffekt				
2	Ein Loch im Schaltschrank lässt Wasser eindringen	-	Wasserschaden und aufwendigere Klimatisierung des Schaltschranks	8	Installation einer Kamera empfohlen	8 (ohne Kamera)	Jährliche Besichtigung
2	Ein Loch im Schaltschrank lässt Wasser eindringen; Interne Geräte werden schockbelastet		Keine Aufnahme von Messdaten	8	Installation einer Kamera empfohlen	8 (ohne Kamera)	Jährliche Besichtigung
2	Funktion des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden; Kühlleistung zu gering	-	Erhitzen des Schaltschranks	8	Thermostat	2	Blitzeinschlag: SPD; Vereisung: Heizung; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank;
1	Funktion des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden; Kühlleistung zu gering	-	Erhitzen des Schaltschranks	7	Überwachung über Controller und Bildschirmausgabe (Displayanzeige A2, A4, A5); Thermostat	2	Vereisung: Heizung
2	Die Betriebstemperatur des Kühlers könnte unter- oder überschritten werden	Funktion des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Potentiell langsames Erhitzen des Schaltschranks	6	Überwachung über Controller und Bildschirmausgabe (Displayanzeige A13); Thermostat	2	-
2	Starker Rotorverschleiß	Lebenszeit des Kühlers wird herabgesetzt	-	5	Überwachung über Controller und Bildschirmausgabe (Displayanzeige A11, A12); Thermostat	2	-
2	Starker Rotorverschleiß	Lebenszeit des Kühlers wird herabgesetzt	-	5	Überwachung über Controller und Bildschirmausgabe (Displayanzeige A11, A12); Thermostat	2	-
1	Verlust der Gaskapazität	Funktion des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Potentiell langsames Erhitzen des Schaltschranks	6	Überwachung über Controller und Bildschirmausgabe (Displayanzeige A11, A12); Thermostat	2	-
1	Verlust der Gaskapazität	Funktion des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Potentiell langsames Erhitzen des Schaltschranks	6	Überwachung über Controller und Bildschirmausgabe (Displayanzeige A11, A12) bzw. Controller - Pressostat	2	-
1	Übermäßige Gaskapazität	Aufbersten der Kühlmittleitungen und Ausfall des Kühlers	Erhitzen des Schaltschranks	7	Überwachung über Controller und Bildschirmausgabe (Displayanzeige A11, A12) bzw. Controller - Pressostat	2	-
2	Eine korrekte Druckeinstellung des Verdichters ist nicht mehr gewährleistet	Funktion des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Potentiell langsames Erhitzen des Schaltschranks	6	Überwachung über Controller und Bildschirmausgabe (Displayanzeige A6); Thermostat	2	-
2	Angestaute Wärme wird zu langsam aus dem Schaltschrank geführt	Funktion des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Potentiell langsames Erhitzen des Schaltschranks	6	Thermostat	2	-
2	Angestaute Wärme wird kaum bis gar nicht aus dem Schaltschrank geführt	Funktion des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Potentiell schnelles Erhitzen des Schaltschranks	8	Überwachung über Controller und Bildschirmausgabe (Displayanzeige A9); Thermostat	2	-
1	Angestaute Wärme wird sehr schnell aus dem Schaltschrank geführt; Lebenszeitherabsetzung des Ventilators	Funktion des Kühlers ist noch gewährleistet	-	5		2	-

MTBF	MTTR	Fehlergrad			
		Auftreten	Entdeckung	Bedeutung	RPN
-	-	2	8 (ohne Kamera)	8	128
-	-	2	8 (ohne Kamera)	8	128
>10y	-	2	2	8	32
-	-	1	2	7	14
>10y (500000 Schaltzyklen)	0.33h	2	2	6	24
>10y	2h	2	2	5	20
>10y	2h	2	2	5	20
>10y	2h	1	2	6	12
>10y	2h	1	2	6	12
10y	2h	1	2	7	14
>10000 Schaltzyklen	0,33h	2	2	6	24
-	-	2	2	6	24
63000h bei 30°C 55000h bei 45°C	0,5h	2	2	8	32
-	-	1	2	5	10

Bauteilkennung			Funktion	Potentieller Fehlerfall	Fehlermechanismus
Unternehmen	Gerät	Gerätekomponenten			
Rittal	Wandanbau-Kühlgerät TopTherm Blue e, UL Type 3R/4 – SK 3305.508	Verflüssigerventilator	Luftzirkulation zum Wärmeaustausch nach Verdichter	Kontamination der Rotoren	Operation in kontaminierter Luft (z.B. säurehaltig, Landwirt versprüht Pflanzenschutzmittel)
		Thermostatisches Expansionsventil	Kühlmittel entspannen und verdampfen	Ventil öffnet nicht weit genug	Fühlerdruck zu gering oder Federdruck zu groß
		Thermostatisches Expansionsventil	Kühlmittel entspannen und verdampfen	Ventil öffnet nicht	Fühlerdruck zu gering oder Federdruck zu groß
		Thermostatisches Expansionsventil	Kühlmittel entspannen und verdampfen	Ventil öffnet zu weit	Fühlerdruck zu hoch oder Federdruck zu gering
		Verdampfer	Kühlmittel verdampfen und Wärmeaustausch zum Schrankinneren	Wärmeaufnahme des Kühlmittels zu gering	Kondensationsspulen verschmutzt
		Verdampfer	Kühlmittel verdampfen und Wärmeaustausch zum Schrankinneren	Leck in Kondensationsspulen	Schock- oder Vibrationsbelastung; Korrosion durch Kontamination der Außenluft (z.B. Wasser, Landwirt versprüht Pflanzenschutzmittel)
		Verdampfer	Kühlmittel verdampfen und Wärmeaustausch zum Schrankinneren	Vereisen des Kühlmittels im Verdampfer	Umgebungstemperatur niedriger als Gefrierpunkt des Kältemittels
		Verdampferventilator	Luftzirkulation zum Wärmeaustausch am Verdampfer	Luftzufluss kleiner als benötigt	Zu langsames Drehen des Ventilators
		Verdampferventilator	Luftzirkulation zum Wärmeaustausch am Verdampfer	Luftzufluss kleiner als benötigt	Nichtanlaufen des Ventilators
		Verdampferventilator	Luftzirkulation zum Wärmeaustausch am Verdampfer	Luftzufluss größer als benötigt	Zu schnelles Drehen des Ventilators
		Verdampferventilator	Luftzirkulation zum Wärmeaustausch am Verdampfer	Kontamination der Rotoren	Operation in kontaminierter Luft (z.B. säurehaltig, Landwirt versprüht Pflanzenschutzmittel)
		Verdampfer - Thermostat	Korrekte Messung der Temperatur im Verdampfer	Falsche oder keine Temperaturermittlung	Defekter Sensor
		Luftfilter	Filterung der Luft von Partikeln	Kontamination des Filters	Operation in kontaminierter Luft (z.B. Säurehaltig oder Landwirt sprüht Pestizid)
		Luftfilter	Filterung der Luft von Partikeln	Verstopfter Filter	Filter voll mit herausgefilterten Partikeln

Auftreten (1-10)	Fehlereffekte			Bedeutung (1-10)	Detektionsmethode	Detektion (1-10)	Kompensationsmethode
	Lokal	Nächst höheres Level	Endeffekt				
1	Starker Rotorverschleiß	Lebenszeit des Kühlers wird herabgesetzt	-	5		2	-
2	Reduktion der Gaskapazität; hohes Entspannungsverhältnis	Funktion des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Potentiell langsames Erhitzen des Schaltschranks	6	Thermostat	2	-
2	Keine Entspannung möglich	Funktion des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Potentiell schnelles Erhitzen des Schaltschranks	8	Thermostat	2	-
2	Zu geringes Entspannungsverhältnis; Kühlmitteltemperatur nicht niedrig genug	Funktion des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Potentiell langsames Erhitzen des Schaltschranks	6	Thermostat	2	-
2	Geringe Wärmeübertragung von Schrankinnenluft zu Kühlmittel	Funktion des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Potentiell langsames Erhitzen des Schaltschranks	6	Überwachung über Controller und Bildschirmausgabe (Displayanzeige A7, A14); Thermostat	2	-
2	Kühlmittel läuft aus und geringe Wärmeübertragung von Schrankinnenluft zu Kühlmittel	Funktion des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Potentiell schnelles Erhitzen des Schaltschranks	8	Überwachung über Controller und Bildschirmausgabe (Displayanzeige A7, A14); Thermostat	2	-
1	Zufrieren des Verdampfers und Stilllegung des Kühlkreislufs	Funktion des Kühlers kann nach Schmelzen nicht mehr gewährleistet werden	Potentiell schnelles Erhitzen des Schaltschranks	8	Überwachung über Controller und Bildschirmausgabe (Displayanzeige A7, A14) bzw. Verdampfer - Thermostat; Thermostat	2	Temperaturüberwachung des Verdampfers
2	Angestaute Wärme wird zu langsam aus dem Schaltschrank geführt	Funktion des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Potentiell langsames Erhitzen des Schaltschranks	6	Thermostat	2	-
2	Angestaute Wärme wird kaum bis gar nicht aus dem Schaltschrank geführt	Funktion des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Potentiell schnelles Erhitzen des Schaltschranks	8	Überwachung über Controller und Bildschirmausgabe (Displayanzeige A10); Thermostat	2	-
1	Angestaute Wärme wird sehr schnell aus dem Schaltschrank geführt; Lebenszeitherabsetzung des Ventilators	Funktion des Kühlers ist noch gewährleistet	-	4		2	-
2	Starker Rotorverschleiß	Lebenszeit des Kühlers wird herabgesetzt	-	5		2	-
2	Vereisen des Verdampfers möglich	Funktion des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Potentiell schnelles Erhitzen des Schaltschranks	8	Überwachung über Controller und Bildschirmausgabe (Displayanzeige A14); Thermostat	2	-
4	Starker Filterverschleiß	-	-	5	Mind. 1 Mal jährlich eine Kontrolle vor Ort	2	Landwirt aufmerksam auf die Gefahr von Pestizidenn machen
4	Luftdurchlass geringer als benötigt	Funktion des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Potentiell langsames Erhitzen des Schaltschranks	6	Mind. 1 Mal jährlich eine Kontrolle vor Ort	2	1x-2x jährlich Filterwechsel

MTBF	MTTR	Fehlergrad			
		Auftreten	Entdeckung	Bedeutung	RPN
-	-	1	2	5	10
-	-	2	2	6	24
-	-	2	2	8	32
-	-	2	2	6	24
-	-	2	2	6	24
-	-	2	2	8	32
-	-	1	2	8	16
-	-	2	2	6	24
63000h bei 30°C 55000h bei 45°C	0,5h	2	2	8	32
-	-	1	2	4	8
-	-	2	2	5	20
-	-	2	2	8	32
-	-	4	2	5	40
8760h	0.017h	4	2	6	48

Bauteilkennung			Funktion	Potentieller Fehlerfall	Fehlermechanismus
Unternehmen	Gerät	Gerätekomponenten			
Rittal	Wandanbau-Kühlgerät TopTherm Blue e, UL Type 3R/4 – SK 3305.508	Buskabel zu anderen Kühlgeräten	Verbinden aller Kühlgeräte miteinander zur Ansteuerung von außerhalb	Keine Datenübertragung	Gerät defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs; Wasserschaden; Tiere
		Datenkabel zu IoT-Adapter	Steuerungsbefehle und Informationsweitergabe der Kühlgeräte über IoT Adapter	Keine Datenübertragung	Gerät defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs; Wasserschaden; Tiere
	IoT-Adapter für Kühlgerät	Allgemein	Steuerungsbefehle und Informationsweitergabe an IoT-Interface	Keine Datenübertragung	Gerät defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (0°C - 55°C); Wasserschaden; Tiere
		Elektronik	Verarbeitung der Steuerungsbefehle und Informationen	Keine Verarbeitung	Elektronik defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (0°C - 55°C); Wasserschaden; Tiere
		Datenkabel zu IoT-Interface	Steuerungsbefehle und Informationsweitergabe über IoT-Interface	Keine Datenübertragung	Gerät defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs; Wasserschaden; Tiere
	IoT-Interface für IoT-Adapter	Allgemein	Steuerungsbefehle und Informationsweitergabe zu Switch	Keine Datenübertragung	Gerät defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (0°C - 70°C); Wasserschaden; Tiere
	IoT-Interface für IoT-Adapter	Elektronik	Verarbeitung der Steuerungsbefehle und Informationen	Keine Verarbeitung	Elektronik defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (0°C - 70°C); Wasserschaden; Tiere
	IoT-Interface für IoT-Adapter	Datenkabel zu Switch	Steuerungsbefehle und Informationsweitergabe zu Switch	Keine Datenübertragung	Elektronik defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs; Wasserschaden; Tiere
	Schaltschrank-Heizung mit Lüfter 230V 3105.400	Allgemein	Heizen des Schaltschranks	Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-33°C - 65°C)	Schaltschranktemperatur zu hoch/niedrig
		Lüfter	Erhitze Luft im Schaltschrank verteilen	Luftzufluss kleiner als benötigt	Zu langsames Drehen des Lüfters
		Lüfter	Erhitze Luft im Schaltschrank verteilen	Luftzufluss kleiner als benötigt	Nichtanlaufen des Lüfters

Auftreten (1-10)	Fehlereffekte			Bedeutung (1-10)	Detektionsmethode	Detektion (1-10)	Kompensationsmethode
	Lokal	Nächst höheres Level	Endeffekt				
2	Keine Kommunikation zu anderen Kühlgeräten möglich	Fernüberwachung des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Klimatisierung des Schaltschranks muss vor Ort eingestellt und überwacht werden	8	Keine Kommunikation über einen Browser und Internetzugriff möglich	3	Blitzeinschlag: SPD; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank;
2	Keine Kommunikation von Kühlgeräts zu IoT-Adapter möglich	Fernüberwachung des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Klimatisierung des Schaltschranks muss vor Ort eingestellt und überwacht werden	8	Keine Kommunikation über einen Browser und Internetzugriff möglich	3	Blitzeinschlag: SPD; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank;
2	Keine Kommunikation von IoT-Adapters zu IoT-Interface möglich	Fernüberwachung des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Klimatisierung des Schaltschranks muss vor Ort eingestellt und überwacht werden	8	Keine Kommunikation über einen Browser und Internetzugriff möglich	3	Blitzeinschlag: SPD; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank;
2	Keine Kommunikation von IoT-Adapters zu IoT-Interface möglich	Fernüberwachung des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Klimatisierung des Schaltschranks muss vor Ort eingestellt und überwacht werden	8	Keine Kommunikation über einen Browser und Internetzugriff möglich	3	Blitzeinschlag: SPD; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank;
2	Keine Kommunikation von IoT-Adapters zu IoT-Interface möglich	Fernüberwachung des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Klimatisierung des Schaltschranks muss vor Ort eingestellt und überwacht werden	8	Keine Kommunikation über einen Browser und Internetzugriff möglich	3	Blitzeinschlag: SPD; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank;
2	Keine Kommunikation von IoT-Interface zu Switch möglich	Fernüberwachung des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Klimatisierung des Schaltschranks muss vor Ort eingestellt und überwacht werden	8	Keine Kommunikation über einen Browser und Internetzugriff möglich	3	Blitzeinschlag: SPD; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank;
2	Keine Kommunikation von IoT-Interface zu Switch möglich	Fernüberwachung des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Klimatisierung des Schaltschranks muss vor Ort eingestellt und überwacht werden	8	Keine Kommunikation über einen Browser und Internetzugriff möglich	3	Blitzeinschlag: SPD; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank;
2	Keine Kommunikation von IoT-Interface zu Switch möglich	Fernüberwachung des Kühlers kann nicht mehr gewährleistet werden	Klimatisierung des Schaltschranks muss vor Ort eingestellt und überwacht werden	8	Keine Kommunikation über einen Browser und Internetzugriff möglich	3	Blitzeinschlag: SPD; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank;
1	Funktion der Heizung kann nicht mehr gewährleistet werden; Heizleistung zu gering	-	Unterkühlen des Schaltschranks und Bildung von Kondensat	7	Thermostat	2	-
2	Nicht genug Wärmeaustausch durch Konvektion möglich	Funktion der Heizung kann nicht mehr gewährleistet werden	Potentiell langsames Unterkühlen des Schaltschranks	6	Thermostat	2	Heizung wird im Schrankunterteil eingebaut, sodass die Wärme nach oben steigt
2	Kaum bis kein Wärmeaustausch durch Konvektion möglich	Funktion der Heizung kann nicht mehr gewährleistet werden	Potentiell schnelles Unterkühlen des Schaltschranks	8	Thermostat	2	Heizung wird im Schrankunterteil eingebaut, sodass die Wärme nach oben steigt

MTBF	MTTR	Fehlergrad			
		Auftreten	Entdeckung	Bedeutung	RPN
-	-	2	3	8	48
-	-	2	3	8	48
-	-	2	3	8	48
-	-	2	3	8	48
-	-	2	3	8	48
-	-	2	3	8	48
-	-	2	3	8	48
-	-	2	3	8	48
-	-	1	2	7	14
-	-	2	2	6	24
-	-	2	2	8	32

Bauteilkennung			Funktion	Potentieller Fehlerfall	Fehlermechanismus
Unternehmen	Gerät	Gerätekomponenten			
Rittal	Schaltschrank-Heizung mit Lüfter 230V 3105.400	Lüfter	Erhitze Luft im Schaltschrank verteilen	Luftzufluss größer als benötigt	Zu schnelles Drehen des Lüfters
		PTC-Heizelement	Erhitzen der Umgebungsluft	Hohe Auslastung oder Ausfall	Staubablagerung; zu geringer Luftstrom der Ventilatoren;
Thies	Windgeber First Class Advanced 4.3351.00.141	Allgemein	Erfassung der horizontalen Windkomponente	Kein Erfassen einer Windgeschwindigkeit	Sensor defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-50°C - 80°C)
		Allgemein	Erfassung der horizontalen Windkomponente	Falsches Erfassen der Windgeschwindigkeit oder Eindringen von Wasser	Falsche Montage (nur senkrecht zulässig)
		Schalen	Eine Welle durch Wind in eine Drehung versetzen	Schnelleres Drehen als der Wind	Auftreffen eines Gegenstandes auf die Schalen
		Schalen	Eine Welle durch Wind in eine Drehung versetzen	Langsameres Drehen als der Wind	Auftreffen eines Gegenstandes auf die Schalen
		Schalen	Eine Welle durch Wind in eine Drehung versetzen	Kein Drehen der Welle	Auftreffen eines Gegenstandes auf die Schalen; Ein Objekt oder Tier (z.B. ein Vogel) blockiert die Schalen
		Kugellager	Drehen der Welle	Kein Drehen der Welle	Lösung der Dichtung und Eindringen von Wasser oder korrosiver Luft (Salz, Pestizid)
		Optoelektronischer Abtaster	Drehbewegung der Welle in elektrisches Signal umwandeln	Keine oder falsche Übersetzung der Drehbewegung	Sensor defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag
		Frequenz- / Spannungswandler	Signal des optoelektronischen Abtasters in eine streng lineare Ausgangsspannung umwandeln	Keine oder falsche Übersetzung des optoelektronischen Abtasters	Sensor defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag
		Heizung	Heizen des Sensors bei niedrigen Temperaturen	Kein heizen des Sensors	Heizung defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-50°C - 80°C)

Auftreten (1-10)	Fehlereffekte			Bedeutung (1-10)	Detektionsmethode	Detektion (1-10)	Kompensationsmethode
	Lokal	Nächst höheres Level	Endeffekt				
1	Konvektiver Wärmeaustausch geschieht sehr schnell; Lebenszeitherabsetzung des Lüfters	Funktion der Heizung ist noch gewährleistet	-	5	-	8	-
1	Kaum bis kein Wärmeaustausch durch Konvektion möglich	Heizung wird auf hoher Auslastung betrieben	Potentiell schnelleres Altern des PTC-Heizelements	8	-	2	Staub: Schaltschrank
3	Kein Senden eines elektrischen Signals	-	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Starke Abweichung: Kontrolle gegenüber anderen Windgebern; Ausfall: Sehr niedrig erfasste Windgeschwindigkeit; Temperatur: Hygro-Thermogeberverlauf betrachten; Blitzeinschlag: SPD kontrollieren	2	Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers; Stromausfall: USV; Temperatur: Heizung
1	Falsche Geschwindigkeitsaufnahme bis hin zu einer Zerstörung des Sensors	-	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	-	8	Montage: Einbauwinkel und Montageanleitung beachten
2	Durch einen Impuls wird die Welle schneller gedreht, als es der Wind erlaubt	Funktion des Windgebers ist kurzzeitig beeinträchtigt	Kurzzeitig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	7	Starke Abweichung: Kontrolle gegenüber anderen Windgebern	8	Gegenstand: Die Windgeber werden so hoch auf dem Masten platziert, dass ein Auftreffen sehr unwahrscheinlich wird
2	Abbrechen einer Schale führt zu einer geringeren Drehgeschwindigkeit	Funktion des Windgebers kann nicht mehr gewährleistet werden	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Starke Abweichung: Kontrolle gegenüber anderen Windgebern	2	Gegenstand: Die Windgeber werden so hoch auf dem Masten platziert, dass ein Auftreffen sehr unwahrscheinlich wird
3	Durch Beschädigung aller Schalen oder Blockieren wird die Welle nicht in Drehung versetzt	Funktion des Windgebers ist kurzzeitig bis langfristig beeinträchtigt	Kurzzeitige oder langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Starke Abweichung: Kontrolle gegenüber anderen Windgebern; Ausfall: Sehr niedrig erfasste Windgeschwindigkeit	8	Gegenstand: Die Windgeber werden so hoch auf dem Masten platziert, dass ein Auftreffen sehr unwahrscheinlich wird
3	Keine Drehung der Welle und damit falsche Signalerfassung	Funktion des Windgebers ist langfristig beeinträchtigt	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Starke Abweichung: Kontrolle gegenüber anderen Windgebern; Ausfall: Sehr niedrig erfasste Windgeschwindigkeit	2	Hochwirksame Labyrinthdichtung
3	Die Drehfrequenz der Welle wird nicht erfasst	Funktion des Windgebers kann nicht mehr gewährleistet werden	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Starke Abweichung: Kontrolle gegenüber anderen Windgebern; Ausfall: Sehr niedrig erfasste Windgeschwindigkeit	2	Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers; Stromausfall: USV
3	Das Signal des optoelektronischen Abtasters wird nicht korrekt oder gar nicht erfasst	Funktion des Windgebers kann nicht mehr gewährleistet werden	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Starke Abweichung: Kontrolle gegenüber anderen Windgebern; Ausfall: Sehr niedrig erfasste Windgeschwindigkeit	2	Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers; Stromausfall: USV Stromversorgung
3	Gefahr des Einfrierens des Sensors	Funktion des Windgebers kann nicht mehr gewährleistet werden	Kurzzeitige oder langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Starke Abweichung: Kontrolle gegenüber anderen Windgebern; Ausfall: Sehr niedrig erfasste Windgeschwindigkeit; Temperatur: Hygro-Thermogeberverlauf betrachten	2	Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers; Stromausfall: USV

MTBF	MTTR	Fehlergrad			
		Auftreten	Entdeckung	Bedeutung	RPN
-	-	1	8	5	40
-	-	1	2	8	16
95000h	-	3	2	8	48
-	-	1	8	8	64
-	-	2	8	7	112
-	-	2	2	8	32
-	-	3	8	8	192
-	-	3	2	8	48
-	-	3	2	8	48
-	-	3	2	8	48
-	-	3	2	8	48

Bauteilkennung			Funktion	Potentieller Fehlerfall	Fehlermechanismus
Unternehmen	Gerät	Gerätekomponenten			
Thies	Windgeber First Class Advanced 4.3351.00.141	Sensor- und Datenkabel	Stromzufuhr und Datenübertragung zur Messanlage	Keine Stromzufuhr oder Datenübertragung	Stromausfall; Blitzschlag; Beschädigung durch Objekte oder Tiere; Spannungsabfall durch hohe Kabellänge
	Windrichtungsgeber First Class 4.3151.00.141	Allgemein	Erfassen der horizontalen Windrichtung	Kein Erfassen einer Windrichtung	Sensor defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-50°C - 80°C)
		Allgemein	Erfassen der horizontalen Windrichtung	Falsches Erfassen der Windrichtung oder Eindringen von Wasser	Falsche Montage (nur senkrecht zulässig)
		Windfahne	In Richtung des Windes schwenken	Schnelleres Drehen als der Wind	Auftreffen eines Gegenstandes
		Windfahne	In Richtung des Windes schwenken	Langsameres Drehen als der Wind	Auftreffen eines Gegenstandes
		Windfahne	In Richtung des Windes schwenken	Kein Drehen	Auftreffen eines Gegenstandes; Ein Objekt oder Tier (z.B. ein Vogel) blockiert die Windfahne
		Kugellager	Drehen der Welle	Kein Drehen der Welle	Lösung der Dichtung und Eindringen von Wasser oder korrosiver Luft (Salz, Pestizid)
		Tunnel Magneto Resistance (TMR-) Sensor	Winkelstellung der Windfahne über die Lage eines internen Magneten und sein Magnetfeld abtasten	Defekter Sensor (Kurzschluss, offener Stromkreis usw.)	Blitzeinschlag; falsche Spannung
		Elektronik	Umwandlung des TMR-Sensor Signals in einen Winkel und ein Ausgangssignal	Defekte Elektronik (Kurzschluss, offener Stromkreis usw.)	Blitzeinschlag; falsche Spannung
		Heizung	Heizen des Sensors bei niedrigen Temperaturen	Kein heizen des Sensors	Heizung defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-50°C - 80°C)

Auftreten (1-10)	Fehlereffekte			Bedeutung (1-10)	Detektionsmethode	Detektion (1-10)	Kompensationsmethode
	Lokal	Nächst höheres Level	Endeffekt				
3	Keine Stromzufuhr oder Datenübertragung an den bzw. von dem Sensor	-	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Starke Abweichung: Kontrolle gegenüber anderen Windgebern; Ausfall: Sehr niedrig erfasste Windgeschwindigkeit	2	Vögel: Unauffällige Farbe wählen; Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers; Stromausfall: USV; Spannungsabfall: Berücksichtigung im Messergebnis
3	Kein Senden eines elektrischen Signals	-	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Starke Abweichung: Kontrolle gegenüber anderen Windfahnen; Temperatur: Hygro-Thermogeberverlauf betrachten; Blitzeinschlag: SPD kontrollieren	2	Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers; Stromausfall: USV; Temperatur: Heizung
1	Falsche Richtungsaufnahme bis hin zu einer Zerstörung des Sensors	-	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	-	8	Montage: Einbauwinkel und Montageanleitung beachten
2	Durch einen Impuls wird die Windfahne schneller gedreht, als es der Wind erlaubt	Funktion der Windfahne ist kurzzeitig beeinträchtigt	Kurzzeitig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	7	Starke Abweichung: Kontrolle gegenüber anderen Windfahnen	8	Gegenstand: Die Windgeber werden so hoch auf dem Masten platziert, dass ein Auftreffen sehr unwahrscheinlich wird
2	Beschädigung der Windfahne führt zu einer falschen Windrichtung	Funktion der Windfahne kann nicht mehr gewährleistet werden	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Starke Abweichung: Kontrolle gegenüber anderen Windfahnen	2	Gegenstand: Die Windgeber werden so hoch auf dem Masten platziert, dass ein Auftreffen sehr unwahrscheinlich wird
3	Durch Beschädigung der Windfahne oder Blockieren dreht die Windfahne nicht mehr	Funktion der Windfahne ist kurzzeitig bis langfristig beeinträchtigt	Kurzzeitige oder langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Starke Abweichung: Kontrolle gegenüber anderen Windfahnen	8	Gegenstand: Die Windgeber werden so hoch auf dem Masten platziert, dass ein Auftreffen sehr unwahrscheinlich wird
3	Keine Drehung der Welle und damit falsche Signalerfassung	Funktion der Windfahne ist langfristig beeinträchtigt	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Starke Abweichung: Kontrolle gegenüber anderen Windfahnen;	2	Hochwirksame Labyrinthdichtung
3	Falsche bis keine Ermittlung der Winkelstellung	Funktion der Windfahne kann nicht mehr gewährleistet werden	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Starke Abweichung: Kontrolle gegenüber anderen Windfahnen	2	Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers
3	Falsche bis keine Umwandlung der Winkelstellung	Funktion der Windfahne kann nicht mehr gewährleistet werden	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Starke Abweichung: Kontrolle gegenüber anderen Windfahnen	2	Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers
3	Gefahr des Einfrierens des Sensors	Funktion der Windfahne kann nicht mehr gewährleistet werden	Kurzzeitige oder langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Starke Abweichung: Kontrolle gegenüber anderen Windfahnen; Temperatur: Hygro-Thermogeberverlauf betrachten	2	Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers;

MTBF	MTTR	Fehlergrad			
		Auftreten	Entdeckung	Bedeutung	RPN
-	-	3	2	8	48
95000h	-	3	2	8	48
-	-	1	8	8	64
-	-	2	8	7	112
-	-	2	2	8	32
-	-	3	8	8	192
-	-	3	2	8	48
-	-	3	2	8	48
-	-	3	2	8	48
-	-	3	2	8	48

Bauteilkennung			Funktion	Potentieller Fehlerfall	Fehlermechanismus
Unternehmen	Gerät	Gerätekomponenten			
Thies	Windrichtungsgeber First Class 4.3151.00.141	Sensor- und Datenkabel	Stromzufuhr und Datenübertragung zur Messanlage	Keine Stromzufuhr oder Datenübertragung	Stromausfall; Blitzschlag; Beschädigung durch Objekte oder Tiere; Spannungsabfall durch hohe Kabellänge
	Hygro-Thermogeber compact 1.1005.54.441	Allgemein	Messung der relativen Feuchte und Temperatur	Kein Erfassen der rel. Feuchte und Temperatur	Sensor defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-40°C - 60°C)
		Allgemein	Messung der relativen Feuchte und Temperatur	Eindringen von Wasser, Aufheizen des Sensors durch Sonneneinstrahlung	Falsche Montage des Hygro-Thermogebers oder Wetter- und Strahlungsschutzes
		Allgemein	Messung der relativen Feuchte und Temperatur	Falsche Erfassung der rel. Feuchte oder Temperatur	Beschädigung durch Objekte oder Tiere (Steine, Vögel usw.)
		Feuchte-Sensor	Messung der relativen Feuchte	Langsames Reagieren auf Änderungen der rel. Feuchte	Lagerung bei konstanter rel. Feuchte; Staubablagerung
		Feuchte-Sensor	Messung der relativen Feuchte	Defekter Sensor (Kurzschluss, offener Stromkreis usw.)	Blitzeinschlag; falsche Spannung
		Pt 100 Klasse B Temperatursensor	Messung der Temperatur	Defekter Sensor (Kurzschluss, offener Stromkreis usw.)	Blitzeinschlag; falsche Spannung
		Sensor- und Datenkabel	Stromzufuhr und Datenübertragung zur Messanlage	Keine Stromzufuhr oder Datenübertragung	Stromausfall; Blitzeinschlag; Beschädigung durch Objekte oder Tiere; Spannungsabfall durch hohe Kabellänge
	Wetter- und Strahlungsschutz compact 1.1025.55.100	Allgemein	Schutz des Hygro-Thermogebers vor Niederschlag und Sonneneinstrahlung	Wasser und Sonne trifft dennoch auf den Hygro-Thermogeber	Falsche Montage

Auftreten (1-10)	Fehlereffekte			Bedeutung (1-10)	Detektionsmethode	Detektion (1-10)	Kompensationsmethode
	Lokal	Nächst höheres Level	Endeffekt				
3	Keine Stromzufuhr oder Datenübertragung an den bzw. von dem Sensor	-	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Starke Abweichung: Kontrolle gegenüber anderen Windfahnen	2	Vögel: Unauffällige Farbe wählen; Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers; Stromausfall: USV; Spannungsabfall: Berücksichtigung im Messergebnis
3	Kein Senden eines elektrischen Signals	-	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Zerstörung: Die Werte in der Messanlage sind sehr niedrig; Abweichung: Vergleich mit allgemeinem Wetter in Krummendeich; Temperatur: Hygro-Thermogeberverlauf betrachten; Blitzeinschlag: SPD kontrollieren	2	Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers; Stromausfall: USV
1	Falsche Aufnahme der rel. Feuchte und Temperatur bis hin zu einer Zerstörung des Sensors	-	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Zerstörung: Die Werte in der Messanlage sind sehr niedrig; Abweichung: Vergleich mit allgemeinem Wetter in Krummendeich	8	Montage: Einbauwinkel und Montageanleitung beachten
3	Falsche Aufnahme der rel. Feuchte oder Temperatur bis hin zu einer Zerstörung des Sensors	-	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Zerstörung: Die Werte in der Messanlage sind sehr niedrig; Abweichung: Vergleich mit allgemeinem Wetter in Krummendeich	2	Montage eines Wetter- und Strahlungsschutzes
10	Reversible Reaktionsträgheit des Feuchtesensors	Reversible Reaktionsträgheit bei Aufnahme der rel. Feuchte	Kurzfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	7		8	Lagerung bei veränderlichen rel. Feuchte bzw. Regeneration nach falscher Lagerung durchführen (siehe Bedienungsanleitung); Sinterfilter anbringen
3	Falsche bis keine Ermittlung der rel. Feuchte	Funktion des Hygro-Thermogebers kann nicht mehr gewährleistet werden	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Zerstörung: Die Werte in der Messanlage sind sehr niedrig; Abweichung: Vergleich mit allgemeinem Wetter in Krummendeich	2	Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers
3	Falsche bis keine Ermittlung der Temperatur	Funktion des Hygro-Thermogebers kann nicht mehr gewährleistet werden	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Zerstörung: Die Werte in der Messanlage sind sehr niedrig; Abweichung: Vergleich mit allgemeinem Wetter in Krummendeich	2	Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers
3	Keine Stromzufuhr oder Datenübertragung an den bzw. von dem Sensor	-	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Zerstörung: Die Werte in der Messanlage sind sehr niedrig; Abweichung: Vergleich mit allgemeinem Wetter in Krummendeich	2	Vögel: Unauffällige Farbe wählen; Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers; Stromausfall: USV; Spannungsabfall: Berücksichtigung im Messergebnis
1	Falsche Aufnahme der rel. Feuchte und Temperatur bis hin zu einer Zerstörung des Sensors	Funktion des Hygro-Thermogebers kann nicht mehr gewährleistet werden	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Zerstörung: Die Werte in der Messanlage sind sehr niedrig; Abweichung: Vergleich mit allgemeinem Wetter in Krummendeich	8	Montage: Montageanleitung beachten;

MTBF	MTTR	Fehlergrad			
		Auftreten	Entdeckung	Bedeutung	RPN
-	-	3	2	8	48
85000h	-	3	2	8	48
-	-	1	8	8	64
-	-	3	2	8	48
-	-	10	8	7	560
-	-	3	2	8	48
-	-	3	2	8	48
-	-	3	2	8	48
-	-	1	8	8	64

Bauteilkennung			Funktion	Potentieller Fehlerfall	Fehlermechanismus
Unternehmen	Gerät	Gerätekomponenten			
Thies	Barometer 3.1157.10.141	Allgemein	Messung des absoluten Luftdrucks	Kein Erfassen des Luftdrucks	Sensor defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-40°C - 65°C); Korrosive Luft (Salzhaltig, Landwirt versprüht Pestizid)
		Piezo-Ceramik-Drucksensor	Messung des absoluten Luftdrucks	Defekter Sensor (Kurzschluss, offener Stromkreis usw.)	Blitzeinschlag; falsche Spannung
		Elektronik	Umwandlung des Drucksensor Signals und Übergabe an eine serielle Schnittstelle	Defekte Elektronik (Kurzschluss, offener Stromkreis usw.)	Blitzeinschlag; falsche Spannung
		Heizung	Heizen des Sensors bei niedrigen Temperaturen	Kein heizen des Sensors	Heizung defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-40°C - 65°C)
		Sensor- und Datenkabel	Stromzufuhr und Datenübertragung zur Messanlage	Keine Stromzufuhr oder Datenübertragung	Stromausfall; Blitzschlag; Beschädigung durch Objekte oder Tiere; Spannungsabfall durch hohe Kabellänge
	Niederschlagssensor 5.4103.20.041	Allgemein	Messung des Niederschlags	Kein Erfassen des Niederschlags	Sensor defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-30°C - 60°C)
		Lichtband bzw. Lichtsensor	Messung des Lichts, welches durch Regen weniger wird	Defekter Sensor (Kurzschluss, offener Stromkreis usw.)	Blitzeinschlag; falsche Spannung

Auftreten (1-10)	Fehlereffekte			Bedeutung (1-10)	Detektionsmethode	Detektion (1-10)	Kompensationsmethode
	Lokal	Nächst höheres Level	Endeffekt				
3	Kein Senden eines elektrischen Signals	-	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Allgemein: RS485 Statuswort zeigt Fehler, Heizungskontrolle, Heizungsstatus und überhöhte Temperatur an; Zerstörung: Die Werte in der Messanlage sind sehr niedrig; Abweichung: Vergleich mit allgemeinem Wetter in Krummendeich; Temperatur: Hygro-Thermogeberverlauf betrachten; Blitzeinschlag: SPD kontrollieren	2	Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers; Stromausfall: USV
3	Falsche bis keine Ermittlung des Luftdrucks	Funktion des Barometers kann nicht mehr gewährleistet werden	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Allgemein: RS485 Statuswort zeigt Fehler, Heizungskontrolle, Heizungsstatus und überhöhte Temperatur an; Zerstörung: Die Werte in der Messanlage sind sehr niedrig; Abweichung: Vergleich mit allgemeinem Wetter in Krummendeich	2	Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers
3	Falsche bis keine Umwandlung des elektrischen Signals des Drucksensors	Funktion des Barometers kann nicht mehr gewährleistet werden	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Allgemein: RS485 Statuswort zeigt Fehler, Heizungskontrolle, Heizungsstatus und überhöhte Temperatur an; Zerstörung: Die Werte in der Messanlage sind sehr niedrig; Abweichung: Vergleich mit allgemeinem Wetter in Krummendeich	2	Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers
3	Gefahr des Einfrierens des Sensors	Funktion des Barometers kann nicht mehr gewährleistet werden	Kurzzeitige oder langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Allgemein: RS485 Statuswort zeigt Fehler, Heizungskontrolle, Heizungsstatus und überhöhte Temperatur an; Zerstörung: Die Werte in der Messanlage sind sehr niedrig; Abweichung: Vergleich mit allgemeinem Wetter in Krummendeich; Temperatur: Hygro-Thermogeberverlauf betrachten	2	Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers;
3	Keine Stromzufuhr oder Datenübertragung an den bzw. von dem Sensor	-	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Allgemein: RS485 Statuswort zeigt Fehler, Heizungskontrolle, Heizungsstatus und überhöhte Temperatur an; Zerstörung: Die Werte in der Messanlage sind sehr niedrig; Abweichung: Vergleich mit allgemeinem Wetter in Krummendeich	2	Vögel: Unauffällige Farbe wählen; Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers; Stromausfall: USV; Spannungsabfall: Berücksichtigung im Messergebnis
3	Kein Senden eines elektrischen Signals	-	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Zerstörung: Die Werte in der Messanlage sind sehr niedrig; Abweichung: Vergleich mit allgemeinem Wetter in Krummendeich; Temperatur: Hygro-Thermogeberverlauf betrachten; Blitzeinschlag: SPD kontrollieren	2	Montage: Montageanleitung beachten; Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers; Stromausfall: USV
3	Falsche bis keine Umwandlung des elektrischen Signals des Lichtsensors	Funktion des Niederschlagsensors kann nicht mehr gewährleistet werden	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Zerstörung: Die Werte in der Messanlage sind sehr niedrig; Abweichung: Vergleich mit allgemeinem Wetter in Krummendeich	2	Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers

MTBF	MTTR	Fehlergrad			
		Auftreten	Entdeckung	Bedeutung	RPN
120000h	-	3	2	8	48
-	-	3	2	8	48
-	-	3	2	8	48
-	-	3	2	8	48
-	-	3	2	8	48
87000h	-	3	2	8	48
-	-	3	2	8	48

Bauteilkennung			Funktion	Potentieller Fehlerfall	Fehlermechanismus
Unternehmen	Gerät	Gerätekomponenten			
Thies	Niederschlagssensor 5.4103.20.041	Elektronik	Umwandlung des Lichtsensor Signals und Übergabe an eine analoge Schnittstelle	Defekte Elektronik (Kurzschluss, offener Stromkreis usw.)	Blitzeinschlag; falsche Spannung
		Heizung	Heizen des Sensors bei niedrigen Temperaturen	Kein heizen des Sensors	Heizung defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-30°C - 60°C)
		Sensor- und Datenkabel	Stromzufuhr und Datenübertragung zur Messanlage	Keine Stromzufuhr oder Datenübertragung	Stromausfall; Blitzschlag; Beschädigung durch Objekte oder Tiere; Spannungsabfall durch hohe Kabellänge
Metek	Ultraschallanemometer uSonic-3 Cage MP	Allgemein	Erfassen der Windkomponenten in drei Achsenrichtungen und der akustischen Temperatur	Kein Erfassen einer Windgeschwindigkeit	Sensor defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-40°C - 60°C)
		Ultraschall-Sensorköpfe	Senden und Empfangen von Ultraschall (30 kHz)	kein Senden oder Empfangen	Gegenstände befinden sich dazwischen (Blätter, Staub, Vogel, Vogelnest); Sensorkopf defekt; Vereisung
		Interne Elektronik und Elektronikbox	Umrechnen der Ergebnisse der Sensorköpfe in Werte und versenden an Ethernet und analoge Schnittstelle	Keine oder falsche Umrechnung	Sensorkopf defekt; Elektronik defekt; Blitzeinschlag; falsche Spannung
		Heizung	Heizen des Sensors bei niedrigen Temperaturen	Kein heizen des Sensors	Heizung defekt; Stromausfall; Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-40°C - 60°C)
		Sensor- und Datenkabel	Stromzufuhr und Datenübertragung zur Messanlage	Keine Stromzufuhr oder Datenübertragung	Stromausfall; Blitzschlag; Beschädigung durch Objekte oder Tiere; Spannungsabfall durch hohe Kabellänge

Auftreten (1-10)	Fehlereffekte			Bedeutung (1-10)	Detektionsmethode	Detektion (1-10)	Kompensationsmethode
	Lokal	Nächst höheres Level	Endeffekt				
3	Falsche bis keine Umwandlung des elektrischen Signals des Lichtsensors	Funktion des Niederschlagsensors kann nicht mehr gewährleistet werden	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Zerstörung: Die Werte in der Messanlage sind sehr niedrig; Abweichung: Vergleich mit allgemeinem Wetter in Krummendeich	2	Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers
3	Gefahr des Einfrierens des Sensors	Funktion des Niederschlagsensors kann nicht mehr gewährleistet werden	Kurzzeitige oder langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Zerstörung: Die Werte in der Messanlage sind sehr niedrig; Abweichung: Vergleich mit allgemeinem Wetter in Krummendeich; Temperatur: Hygro-Thermogeberverlauf betrachten	2	Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers;
3	Keine Stromzufuhr oder Datenübertragung an den bzw. von dem Sensor	-	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Zerstörung: Die Werte in der Messanlage sind sehr niedrig; Abweichung: Vergleich mit allgemeinem Wetter in Krummendeich	2	Vögel: Unnauffällige Farbe wählen; Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers; Stromausfall: USV; Spannungsabfall: Berücksichtigung im Messergebnis
3	Kein Senden eines elektrischen Signals	Funktion des USA kann nicht mehr gewährleistet werden	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Statuswort; Starke Abweichung: Kontrolle der horizontalen Windkomponente gegenüber anderen Windgebern; Ausfall: Sehr niedrig erfasste Windgeschwindigkeit; Temperatur: Hygro-Thermogeberverlauf betrachten; Blitzeinschlag: SPD kontrollieren	2	Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers; Stromausfall: USV; Temperatur: Heizung
4	Falsche Berechnung der Windkomponenten	Funktion des USA kann nicht mehr gewährleistet werden	Kurz- oder langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Sensorwerte OD und OI zeigen fehlerhafte Sensorköpfe an; Statuswort	2	Vereisung: Heizung
3	Falsche Berechnung der Windkomponenten	Funktion des USA kann nicht mehr gewährleistet werden	Kurz- oder langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Sensorwerte OD und OI zeigen fehlerhafte Sensorköpfe an; Statuswort	2	-
3	Gefahr des Einfrierens des Sensors	Funktion des USA kann nicht mehr gewährleistet werden	Kurzzeitige oder langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Sensorwert H2 zeigt fehlerhafte Heizung an; Statuswort	2	Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers;
3	Keine Stromzufuhr oder Datenübertragung an den bzw. von dem Sensor	-	Langfristig falsche Ergebnisse werden an der Messanlage aufgenommen	8	Zerstörung: Die Werte in der Messanlage sind sehr niedrig; Abweichung: Vergleich mit anderen Windgebern	2	Vögel: Unnauffällige Farbe wählen; Blitzeinschlag: Blitzfangstangen am Ende des Auslegers; Stromausfall: USV; Spannungsabfall: Berücksichtigung im Messergebnis

MTBF	MTTR	Fehlergrad			
		Auftreten	Entdeckung	Bedeutung	RPN
-	-	3	2	8	48
-	-	3	2	8	48
-	-	3	2	8	48
-	-	3	2	8	48
-	-	4	2	8	64
-	-	3	2	8	48
-	-	3	2	8	48
-	-	3	2	8	48

Bauteilkennung			Funktion	Potentieller Fehlerfall	Fehlermechanismus
Unternehmen	Gerät	Gerätekomponenten			
Wago	Stromversorgung (2787-2448)	Allgemein	Umwandlung von 230V AC in 24V DC	Zu geringe Leistung, Spannung oder Strom	Gleichzeitiges Einschalten aller Geräte (Strompeak); Stromausfall; Blitzeinschlag; Wasserschaden; Betrieb außerhalb der zulässigen Temperatur -25°C - 70°C; Hardware; Alterung
		Kommunikationsmodul (2789-9080)	Daten zur Überwachung über PFC100-Controller bereitstellen	Ausfall oder falsche Daten	Stromausfall; Blitzeinschlag; Wasserschaden; Betrieb außerhalb der zulässigen Temperatur (-25°C - 70°C); Hardware; Alterung
	USV (787-915)	Allgemein	Überwachung der Spannung und Zuschalten eines Akkumulators bei Unterschreitung von 22V DC	Ausfall oder fehlerhaftes Verhalten	Wasserschaden; Betrieb außerhalb der zulässigen Temperatur (0°C - 50°C); Hardware; Alterung
		Blei-Vlies Akkumulatoren	Speicherung von elektrischer Energie	Keine oder zu wenig Speicherkapazität; Über- oder Unterspannung	Wasserschaden; Betrieb außerhalb der zulässigen Temperatur (-15°C - 40°C); Hardware; Alterung; fehlerhafter Ladeprozess; Akku leer
	Relais (Serie 857)	Allgemein	Schalten eines Kontaktes	Kein oder fehlerhaftes Schalten	Wasserschaden; Betrieb außerhalb der zulässigen Temperatur (-40°C - 60°C); Hardware; Alterung; Bewegungs- und Kontaktfehler
	PFC100 Controller ECO (750-8100)	Allgemein	Steuerung der Wago-Geräte und Abfrage von Stati	Ausfall der Steuerung; Falsche Signalisierung an Module; Keine Stati abrufbar	Wasserschaden; Betrieb außerhalb der zulässigen Temperatur (0°C - 55°C); Hardware; Alterung; Hacker; Programmierung
		Leistungsmessmodul (750-495)	Messung der verbrauchten Leistung	Fehlerhafte oder keine Messung	Wasserschaden; Betrieb außerhalb der zulässigen Temperatur (0°C - 55°C); Hardware; Alterung
		16-Kanal-Digitaleingangsklemme (750-1405)	Verarbeiten von digitalen Eingangssignalen	Fehlerhafte oder keine Verarbeitung	Wasserschaden; Betrieb außerhalb der zulässigen Temperatur (0°C - 55°C); Hardware; Alterung
		16-Kanal-Digitalausgangsklemme (750-1500)	Verarbeiten von digitalen Ausgangssignalen	Fehlerhafte oder keine Verarbeitung	Wasserschaden; Betrieb außerhalb der zulässigen Temperatur (0°C - 55°C); Hardware; Alterung
Dehn	Blitzductor XT Basisteil (BXT BAS)	Allgemein	Vierpolige, universelle Durchgangsklemme für Ableitermodule	Defektes Modul (Kurzschluss, offener Stromkreis usw.)	Wasserschaden; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-40°C - 80°C); Spannungspegel bis zur Auslösespannung bleiben unerkant
	Blitzductor XT Ableitermodul (BXT ML4 BE 24)	Allgemein	Schutz von vier Einzeladern mit gemeinsamen Bezugspotential sowie unsymmetrischer Schnittstellen gegenüber einem Blitzeinschlag für Analog- und Stromleitungen der Sensoren	Defektes Modul (Kurzschluss, offener Stromkreis usw.); kein Überspannungsschutz	Blitzeinschlag; Wasserschaden; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-40°C - 80°C); Spannungspegel bis zur Auslösespannung bleiben unerkant
	Blitzductor XT Ableitermodul (BXT ML4 BD 24)	Allgemein	Schutz von zwei Doppeladern erdpotentielfreier symmetrischer Schnittstellen gegenüber einem Blitzeinschlag für Stromleitungen der Sensorheizungen	Defektes Modul (Kurzschluss, offener Stromkreis usw.); kein Überspannungsschutz	Blitzeinschlag; Wasserschaden; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-40°C - 80°C); Spannungspegel bis zur Auslösespannung bleiben unerkant

Auftreten (1-10)	Fehlereffekte			Bedeutung (1-10)	Detektionsmethode	Detektion (1-10)	Kompensationsmethode
	Lokal	Nächst höheres Level	Endeffekt				
2	Keine Stromzufuhr an angeschlossene Geräte	-	Ausfall aller angeschlossenen Geräte	8	Über Kommunikationsmodul und PFC100-Controller können verschiedene Stati angezeigt und gemeldet werden	2	Anschalten: Nacheinander; Blitzeinschlag: SPD; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät; Hardware: Derating
2	Keine Stati empfangbar	Stromversorgung kann nur direkt auf Fehler untersucht werden	-	4	PFC100-Controller gibt Fehlermeldung	2	Blitzeinschlag: SPD; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät;
2	Keine Bereitstellung von Strom bei Stromausfall; Unnötiges Zuschalten des Akkus	-	Ausfall aller angeschlossenen Geräte	8	PFC100-Controller gibt Fehlermeldung	2	Blitzeinschlag: SPD; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät;
2	Keine oder unzureichende Speicherung von elektrischer Energie	USV kann nicht einspringen	Ausfall aller angeschlossenen Geräte oder nur kurzzeitige Überbrückung	8	PFC100-Controller gibt Fehlermeldung; Allgemeiner Austausch nach 3-4 Jahren	2	Blitzeinschlag: SPD; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät; Hardware: Derating
2	Kein oder fehlerhaftes Schalten	-	Ungewolltes Schalten von Relais	8		6	Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät Kontaktfehler: Wenige Schaltungszyklen
2	Gerät zeigt keine Stati an und bietet keine Steuerung; Falsche Signalisierung an Module	-	Ungewolltes Schalten von Relais oder anderen Funktionen	8	PFC100-Controller gibt Fehlermeldung	2	Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät Hacker: Firewall; Programmierung: Tests
2	Fehlerhafte oder keine Anzeige	-	Keine oder fehlerhafte Leistungsdaten	8	PFC100-Controller gibt Fehlermeldung	2	Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät
2	Fehlerhafte oder keine Verarbeitung	-	Stati können nicht angezeigt werden	4	PFC100-Controller gibt Fehlermeldung	2	Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät
2	Fehlerhafte oder keine Verarbeitung	-	Steuerbefehle können nicht durchgeführt werden	4	PFC100-Controller gibt Fehlermeldung	2	Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät
4	Blitzschutz kann nicht mehr gewährleistet werden	-	Andere Geräte an der Stromleitung können beschädigt werden	8	Zustandsüberwachung über Steuer-PC	2	Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät
4	Blitzschutz kann nicht mehr gewährleistet werden	-	Andere Geräte an der Stromleitung können beschädigt werden	8	Zustandsüberwachung über Steuer-PC	2	Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät
4	Blitzschutz kann nicht mehr gewährleistet werden	-	Andere Geräte an der Stromleitung können beschädigt werden	8	Zustandsüberwachung über Steuer-PC	2	Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät

MTBF	MTTR	Fehlergrad			
		Auftreten	Entdeckung	Bedeutung	RPN
900.000h	-	2	2	8	32
-	-	2	2	4	16
-	-	2	2	8	32
-	-	2	2	8	32
-	-	2	6	8	96
-	-	2	2	8	32
-	-	2	2	8	32
-	-	2	2	4	16
-	-	2	2	4	16
>1000y	-	4	2	8	64
>300y	-	4	2	8	64
>300y	-	4	2	8	64

Bauteilkennung			Funktion	Potentieller Fehlerfall	Fehlermechanismus
Unternehmen	Gerät	Gerätekomponenten			
Dehn	Blitzductor XT Ableitermodul (BXT ML4 BD HF 24)	Allgemein	Schutz von zwei Doppeladern erdpotentialfreier hochfrequenter Bussysteme gegenüber einem Blitzeinschlag für GPS-Mouse und RS422- und RS485-Schnittstelle	Defektes Modul (Kurzschluss, offener Stromkreis usw.); kein Überspannungsschutz	Blitzeinschlag; Wasserschaden; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-40°C - 80°C); Spannungspegel bis zur Auslösespannung bleiben unerkannt
	Ableiter für koaxialen Anschluss (DGA G SMA)	Allgemein	Schutz von Koaxialkabeln mit SMA-Stecker gegenüber einem Blitzeinschlag für GNSS Antenne	Defektes Modul (Kurzschluss, offener Stromkreis usw.); kein Überspannungsschutz	Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-40°C - 85°C); Spannungspegel bis zur Auslösespannung bleiben unerkannt
	Ableiter für koaxialen Anschluss (DGA AG N)	Allgemein	Schutz von Koaxialkabeln mit N-Stecker gegenüber einem Blitzeinschlag für Mobilfunkantenne	Defektes Modul (Kurzschluss, offener Stromkreis usw.); kein Überspannungsschutz	Blitzeinschlag; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-40°C - 85°C); Spannungspegel bis zur Auslösespannung bleiben unerkannt
	Ableiter für Datennetze und Ethernetanwendungen (DPA M CLE RJ45B 48)	Allgemein	Schutz der Ethernetverbindung des Ultraschallanemometers gegenüber einem Blitzeinschlag	Defektes Modul (Kurzschluss, offener Stromkreis usw.); kein Überspannungsschutz	Blitzeinschlag; Wasserschaden; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-40°C - 80°C); Spannungspegel bis zur Auslösespannung bleiben unerkannt
	Dehnventil modular (DV M TNS 255 FM)	Allgemein	Schutz des TN-S-Systems (eingehende 3-Phasen Stromleitung zum Schaltschrank) gegenüber einem Blitzeinschlag	Defektes Modul (Kurzschluss, offener Stromkreis usw.); kein Überspannungsschutz	Blitzeinschlag; Wasserschaden; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-40°C - 80°C); Spannungspegel bis zur Auslösespannung bleiben unerkannt
	Condition Monitoring System RFID-LifeCheck (DRC MCM XT)	Allgemein	Zustandsüberwachung von bis zu zehn Blitzductor XT Ableitermodulen	Defektes Modul (Kurzschluss, offener Stromkreis usw.); keine Zustandsüberwachung	Blitzeinschlag; Wasserschaden; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-20°C - 60°C); Stromausfall
		RFID-LifeCheck Sensor	Zustand von bis zu zehn Blitzductor XT Ableitermodulen abfragen und weiterleiten	Defekte Elektronik (Kurzschluss, offener Stromkreis usw.); keine Zustandsüberwachung	Blitzeinschlag; Wasserschaden; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-20°C - 60°C); Stromausfall
		Strom- und RS485-Datenkabel	Stromzufuhr und Datenübertragung zum Steuer-PC über einen RS485-USB-Konverter	Keine Stromzufuhr oder Datenübertragung	Stromausfall; Blitzschlag; Beschädigung durch Tiere
imc	imc BUSDAQflex-4	Allgemein	Messdaten verarbeiten und aufnehmen	Keine oder falsche Aufnahme der Signale	Konfigurationsfehler; Hard- (CPU, Motherboard, SSD, HDD usw.)und Softwarefehler (Betriebssystem usw.); Stromversorgung und -ausfall; Konnektoren und Kabel intern sowie extern defekt, entfernt oder unsachgemäß verbunden; Alterung; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-40°C - 85°C); Wasserschaden;
		Strom- und Datenkabel	Stromzufuhr und Datenübertragung zur Messanlage	Keine Stromzufuhr oder Datenübertragung	Stromausfall; Beschädigung durch Tiere; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs; Wasserschaden;

Auftreten (1-10)	Fehlereffekte			Bedeutung (1-10)	Detektionsmethode	Detektion (1-10)	Kompensationsmethode
	Lokal	Nächst höheres Level	Endeffekt				
4	Blitzschutz kann nicht mehr gewährleistet werden	-	Andere Geräte an der Stromleitung können beschädigt werden	8	Zustandsüberwachung über Steuer-PC	2	Stromausfall: USV; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät
4	Blitzschutz kann nicht mehr gewährleistet werden	-	Andere Geräte an der Stromleitung können beschädigt werden	8	Kein Empfang des Signals der Antenne	2	Stromausfall: USV; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät
4	Blitzschutz kann nicht mehr gewährleistet werden	-	Andere Geräte an der Stromleitung können beschädigt werden	8	Kein Empfang des Signals der Antenne	2	Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät
4	Blitzschutz kann nicht mehr gewährleistet werden	-	Andere Geräte an der Stromleitung können beschädigt werden	8	Kein Empfang des Signals des Ultraschallanemometers über Ethernet	2	Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät
4	Blitzschutz kann nicht mehr gewährleistet werden	-	Andere Geräte an der Stromleitung können beschädigt werden	8	Stromausfall aller Geräte bzw. Einspringen der USV	2	Stromausfall: USV; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät
2	Zustand der Ableitermodule kann nicht eingesehen werden	-	Für eine Überwachung der Ableitermodule muss eine Person diese vor Ort überprüfen	4	Nichterreichen der Zustandsüberwachung über den Steuer-PC	2	Stromausfall: USV; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät
2	Zustand der Ableitermodule kann nicht eingesehen werden	kein Einsehen des Zustandes der Ableitermodule	Für eine Überwachung der Ableitermodule muss eine Person diese vor Ort überprüfen	4	Nichterreichen der Zustandsüberwachung über den Steuer-PC	2	Stromausfall: USV
2	Keine Stromzufuhr oder Datenübertragung der Zustandsüberwachung	kein Einsehen des Zustandes der Ableitermodule	Für eine Überwachung der Ableitermodule muss eine Person diese vor Ort überprüfen	4	Nichterreichen der Zustandsüberwachung über den Steuer-PC	2	Stromausfall: USV; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank;
2	Messsystem führt seine Aufgabe nicht mehr korrekt aus	-	Aufnahme der Messergebnisse erfolgt nicht mehr oder fehlerhaft und eine Lücke bei der Auswertung entsteht	8	Messanlage signalisiert Fehler in Software imc Studio	2	Konfiguration: Vier-Augen-Prinzip Stromausfall: USV; Temperatur: Klimagerät; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Allgemein: Fehlerbehandlung durch Messprogramm und Handbuch
2	Keine Stromzufuhr oder Datenübertragung des Messsystems	keine Übertragung von Messergebnissen	Aufnahme der Messergebnisse erfolgt nicht mehr oder fehlerhaft und eine Lücke bei der Auswertung entsteht	8	Messanlage signalisiert Fehler in Software imc Studio	2	Stromausfall: USV; Temperatur: Klimagerät; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank

MTBF	MTTR	Fehlergrad			
		Auftreten	Entdeckung	Bedeutung	RPN
>300y	-	4	2	8	64
>4000y	-	4	2	8	64
>4000y	-	4	2	8	64
>600y	-	4	2	8	64
>1000y	-	4	2	8	64
>37y	-	2	2	4	16
-	-	2	2	4	16
-	-	2	2	4	16
25 - 30y	-	2	2	8	32
-	-	2	2	8	32

Bauteilkennung			Funktion	Potentieller Fehlerfall	Fehlermechanismus
Unternehmen	Gerät	Gerätekomponenten			
imc	imc CANSASflex-CI8	Allgemein	Analoge Signale empfangen und verarbeiten	Keine oder falsche Erfassung der Signale	Konfigurationsfehler; Hard- und Softwarefehler; Stromversorgung und -ausfall; Konnektoren und Kabel intern sowie extern defekt, entfernt oder unsachgemäß verbunden; Alterung; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-40°C - 85°C); Wasserschaden;
	imc CANSASfle-UNI8	Allgemein	Analoge Signale für ein Health Monitoring empfangen und verarbeiten	Keine oder falsche Erfassung der Signale	Konfigurationsfehler; Hard- und Softwarefehler; Stromversorgung und -ausfall; Konnektoren und Kabel intern sowie extern defekt, entfernt oder unsachgemäß verbunden; Alterung; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs (-40°C - 85°C); Wasserschaden;
	imc BUSFX/Net-Switch-5	Allgemein	Anbindung des USA, Steuer-PC, WAGO PFC100-Controller und Messsystems	DoS	Fehlerhafte Konfiguration; Stromausfall; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs; Wasserschaden; Weitergabe des Passworts oder zu schwaches Passwort; Softwarefehler
-	Steuer-PC	Allgemein	Steuerung und Aufnahme (Messprogramm, USA, SPD-Prüfung)	Steuer-PC wird in seiner Aufgabe behindert (Hängenbleiben, Programmabsturz, Ausfall usw.)	Hard- (CPU, Motherboard, SSD, HDD usw.)und Softwarefehler (Betriebssystem usw.); Stromversorgung und -ausfall; Konnektoren und Kabel intern sowie extern defekt, entfernt oder unsachgemäß verbunden; Alterung; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs; Wasserschaden; Hacker

Auftreten (1-10)	Fehlereffekte			Bedeutung (1-10)	Detektionsmethode	Detektion (1-10)	Kompensationsmethode
	Lokal	Nächst höheres Level	Endeffekt				
2	Messmodul führt seine Aufgabe nicht mehr korrekt aus	-	Aufnahme der Messergebnisse erfolgt nicht mehr oder fehlerhaft und eine Lücke bei der Auswertung entsteht	8	Messanlage signalisiert Fehler in Software imc Studio	2	Konfiguration: Vier-Augen-Prinzip Stromausfall: USV; Temperatur: Klimagerät; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Allgemein: Fehlerbehandlung durch Messprogramm und Handbuch
2	Messmodul führt seine Aufgabe nicht mehr korrekt aus	-	Aufnahme der Health Monitoring Daten erfolgt nicht mehr oder fehlerhaft	4	Die Messsoftware bietet viele Fehlermeldungen	2	Konfiguration: Vier-Augen-Prinzip Stromausfall: USV; Temperatur: Klimagerät; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Allgemein: Fehlerbehandlung durch Messprogramm und Handbuch
2	Keine Verbindung mit dem USA, Steuer-PC, WAGO PFC100-Controller und Messsystems und zwischen den Geräten möglich	-	Messergebnisse müssen auf Messsystem zwischengespeichert werden	8	Dauerhaft keinen Zugriff auf das USA, Steuer-PC, WAGO PFC100-Controller und Messsystems; E-Mail Fehler Service	3	Konfiguration: Vier-Augen-Prinzip Stromausfall: USV; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät Passwort: Mindestlänge, Einsatz von Zahlen und Sonderzeichen, regelmäßige Änderung, sichere Bewahrung; Software: Neustarten durch Relais
2	Steuer-PC führt seine Aufgabe nicht mehr korrekt aus	-	Aufnahme der Messergebnisse erfolgt nicht mehr und eine Zwischenspeicherung muss auf dem Messsystem vorgenommen werden	8	Log-Dateien; Kein Zugriff mehr über Remote-Control, aber auf andere Geräte schon	2	Hardware: Derating; Software: Nur notwendige SW öffnen; Stromausfall: USV; Temperatur: Klimagerät; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Hacker: Firewall; Allgemein: Regelmäßige Backups

MTBF	MTTR	Fehlergrad			
		Auftreten	Entdeckung	Bedeutung	RPN
25 - 30y	-	2	2	8	32
25 - 30y	-	2	2	4	16
-	-	2	3	8	48
-	-	2	2	8	32

Bauteilkennung		Funktion		Potentieller Fehlerfall	Fehlermechanismus
Unternehmen	Gerät	Gerätekomponenten			
-	Steuer-PC	HDD	Speicherung aller Daten	Kein Zugriff mehr auf Speicher; Verlorene Dateien; Geänderte Dateien	Alterung; Malware; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs; Menschlicher Fehler; fehlerhaftes Betriebssystem; Stromausfall; physischer Schaden
-		SSD	Speicherung aller Daten	Kein Zugriff mehr auf Speicher; Verlorene Dateien; Geänderte Dateien	Alterung; Malware; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs; Menschlicher Fehler; fehlerhaftes Betriebssystem; Stromausfall; physischer Schaden
-		Betriebssystem (Windows 10)	Interaktion der Computerressourcen mit einem Benutzer über eine Graphikoberfläche	Absturz, Hängenbleiben und Ausfall von Programmen	Verbuggte, beschädigte oder unsachgemäß installierte Applikationen; Konflikte zwischen zwei gleichzeitig laufenden Applikationen; inkorrekte oder unvollständige Updates; beschädigte Kerndateien; zu geringer Speicherplatz; mangelhafte Wartung der Festplatte
-		CPU	Ausführen bzw. Berechnen aller Aufgaben	Ausfall oder falsche Berechnung	Alterung; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs; Overclocking (Überbelastung); ESD
-		RAM	Zwischenspeichern von Daten	Ausfall oder fehlerhaftes Zwischenspeichern	Alterung; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs; ESD
-		Maus	Interaktion mit dem Computer	Ausfall oder fehlerhaftes Verhalten	Alterung; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs; Verunreinigung des optischen Sensors; schlechte Oberfläche; Treiber defekt
-		Tastatur	Interaktion mit dem Computer	Ausfall oder fehlerhaftes Verhalten	Alterung; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs; Verunreinigungen; Treiber defekt
-		Monitor	Anzeigen der Benutzeroberfläche	Ausfall oder fehlerhaftes Verhalten	Alterung; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs; Verunreinigungen; Treiber defekt; physischer Schaden

Auftreten (1-10)	Fehlereffekte			Bedeutung (1-10)	Detektionsmethode	Detektion (1-10)	Kompensationsmethode
	Lokal	Nächst höheres Level	Endeffekt				
2	Gespeicherte Daten wurden gelöscht oder geändert	-	Messergebnisse gehen verloren	8	Außergewöhnliche Geräusche; Hochfahren dauert lange; HDD zu leise bei Dateiöffnung; Außergewöhnliche Änderungen von Ordner- und Dateinamen; Dateien nicht zugänglich oder fehlend; Informationen in einer Datei sind durcheinander; Dateiöffnung dauert lange; Anzeige von Fehlermeldungen besonders bei Schreib- und Löschvorgängen	2	Malware: Firewall; Temperatur: Klimagerät; Stromausfall: USV; Menschlicher Fehler: Regelmäßige Backups
2	Gespeicherte Daten wurden gelöscht oder geändert	-	Messergebnisse gehen verloren	8	Hochfahren dauert lange; Außergewöhnliche Änderungen von Ordner- und Dateinamen; Dateien nicht zugänglich oder fehlend; Informationen in einer Datei sind durcheinander; Dateiöffnung dauert lange; Anzeige von Fehlermeldungen besonders bei Schreib- und Löschvorgängen	2	Malware: Firewall; Temperatur: Klimagerät; Stromausfall: USV; Menschlicher Fehler: Regelmäßige Backups
3	Programme werden nicht korrekt ausgeführt	-	Messergebnisse gehen verloren	8	Log-Dateien	2	So wenig Software wie möglich laufen lassen; Speicherplatz beobachten und freimachen; Updates zuvor auf anderen PCs testen; Automatische Updates ausschalten
2	Programme werden nicht korrekt ausgeführt	-	Messergebnisse gehen verloren	8	PC fährt nicht hoch; Ausschalten nach Hochfahren; Bildschirm friert ein; Blue Screen	2	Temperatur: Klimagerät; Allgemein: Derating bzw. so wenig Auslastung wie möglich
2	Programme werden nicht korrekt ausgeführt	-	Messergebnisse gehen verloren	8	PC wird über einen Tag immer langsamer; zufälliges Neustarten; Blue Screen; Dateien werden nicht korrekt gespeichert; Installationen schlagen fehl	2	Temperatur: Klimagerät; Allgemein: Derating bzw. so wenig Auslastung wie möglich
2	Eine Interaktion mit dem Computer gestaltet sich schwierig	-	-	4	Verunreinigte Maus; Leere Batterien	2	Temperatur: Klimagerät; Treiber: Treiber immer aktualisieren; Allgemein: Mouspad benutzen; Regelmäßige Reinigung
2	Eine Interaktion mit dem Computer gestaltet sich schwierig	-	-	4	Verunreinigte Tastatur	2	Temperatur: Klimagerät; Treiber: Treiber immer aktualisieren; Allgemein: Regelmäßige Reinigung
2	Die Benutzeroberfläche wird fehlerhaft angezeigt	-	-	4	Bildschirm flackert; Schwarz bleibende Teile; zu dunkler Bildschirm	2	Temperatur: Klimagerät; Treiber: Treiber immer aktualisieren;

MTBF	MTTR	Fehlergrad			
		Auftreten	Entdeckung	Bedeutung	RPN
-	-	2	2	8	32
-	-	2	2	8	32
-	-	3	2	8	48
-	-	2	2	8	32
-	-	2	2	8	32
-	-	2	2	4	16
-	-	2	2	4	16
-	-	2	2	4	16

Bauteilkennung			Funktion	Potentieller Fehlerfall	Fehlermechanismus
Unternehmen	Gerät	Gerätekomponenten			
Meinberg	NTP-Server mit GNSS-Empfänger	Allgemein	Zeitverteilung und -synchronisation an das Netzwerk	DoS	Fehlerhafte Konfiguration; Stromausfall; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs; Wasserschaden; Weitergabe des Passworts oder zu schwaches Passwort; Softwarefehler
		GNSS-Empfänger und Satelliten	Empfang und Verteilung der Zeitinformation an den NTP-Server	Keine Weitergabe einer Zeitinformation möglich	Fehler der Satellitenkonstellation, des Satellitensignals, zu wenig sichtbare Satelliten; Antennendefekt durch Blitzeinschlag
-	Netzwerk Switch Internet	Allgemein	Anbindung aller Systeme an das mobile Internet	DoS	Fehlerhafte Konfiguration; Stromausfall; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs; Wasserschaden; Weitergabe des Passworts oder zu schwaches Passwort; Softwarefehler
-	Netzwerk Switch Zentral	Allgemein	Anbindung des NTP-Servers, Klimageräte, Geräteschrank IECplus & Strukturdynamik und imc BUSFX/Net-Switch (USA, Steuer-PC, WAGO PFC100-Controller, Messsystem)	DoS	Fehlerhafte Konfiguration; Stromausfall; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs; Wasserschaden; Weitergabe des Passworts oder zu schwaches Passwort; Softwarefehler

Auftreten (1-10)	Fehlereffekte			Bedeutung (1-10)	Detektionsmethode	Detektion (1-10)	Kompensationsmethode
	Lokal	Nächst höheres Level	Endeffekt				
2	Keine Zeitverteilung mehr an das Netzwerk	Die Uhren der Geräte laufen dennoch weiter, aber mit unterschridlicher Driftstärke	Die Messergebnisse können zeitlich nicht mehr übereinstimmen	5	Kein Zugriff auf den NTP-Server; Eine zeitliche Drift stellt sich zwischen den Geräten ein (besonders bemerkbar am USA); Anzeige des Geräts mittel GUI und Lampe; E-Mail Fehler Service	2	Konfiguration: Vier-Augen-Prinzip Stromausfall: USV; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät; Passwort: Mindestlänge, Einsatz von Zahlen und Sonderzeichen, regelmäßige Änderung, sichere Bewahrung
1	Keine Weitergabe der hochgenauen Zeitinformation an den NTP-Server; Dieser besitzt jedoch ein OCXO oder TCXO mit einer geringen Drift und versorgt das Netzwerk weiterhin mit einer Zeitinformation	-	-	5	Anzeige des NTP-Servers mittels GUI und Lampe; E-Mail Fehler Service	2	Blitzeinschlag: SPD
2	Keine Verbindung mit dem Netzwerk außer dem Mobilfunkmodul möglich	-	-	5	Dauerhaft keinen Zugriff auf das Netzwerk außer dem Mobilfunkmodul; E-Mail Fehler Service	2	Konfiguration: Vier-Augen-Prinzip Stromausfall: USV; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät; Passwort: Mindestlänge, Einsatz von Zahlen und Sonderzeichen, regelmäßige Änderung, sichere Bewahrung
2	Keine Verbindung zum NTP-Server, Klimageräten, Geräteschrank IECplus & Strukturdynamik und imc BUSFX/Net-Switch und zwischen diesen Geräten	-	-	5	Dauerhaft kein Zugriff auf NTP-Server, Klimageräten, Geräteschrank IECplus & Strukturdynamik und imc BUSFX/Net-Switch (USA, Steuer-PC, WAGO PFC100-Controller, Messsystem); E-Mail Fehler Service	2	Konfiguration: Vier-Augen-Prinzip Stromausfall: USV; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät; Passwort: Mindestlänge, Einsatz von Zahlen und Sonderzeichen, regelmäßige Änderung, sichere Bewahrung

MTBF	MTTR	Fehlergrad			
		Auftreten	Entdeckung	Bedeutung	RPN
328.336 h	-	2	2	5	20
-	-	1	2	5	10
-	-	2	2	5	20
-	-	2	2	5	20

Bauteilkennung			Funktion	Potentieller Fehlerfall	Fehlermechanismus
Unternehmen	Gerät	Gerätekomponenten			
-	Mobilfunkmodul	Allgemein	Verbindung zum internen Netzwerk von außen herstellen	DoS	Fehlerhafte Konfiguration; Stromausfall; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs; Wasserschaden; Weitergabe des Passworts oder zu schwaches Passwort; Ausfall des Signals eines Providers; Softwarefehler
-	Firewall-Rechner	Allgemein	Blockieren und Durchlassen von Datenverkehr	Leak oder DoS	Fehlerhafte Konfiguration; Stromausfall; Betrieb außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs; Wasserschaden; Weitergabe des Passworts oder zu schwaches Passwort; Softwarefehler
		Prozessor	Bearbeiten von Zugriffsanfragen	Überlastung des Prozessors und DoS	Zu viele Zugriffsanfragen werden gestellt
		Arbeitsspeicher	Bearbeiten von Zugriffsanfragen	Überlastung des Arbeitsspeichers und DoS	Zu viele Zugriffsanfragen werden gestellt
		SSD	siehe Steuer-PC		
		Betriebssystem: Linux (CentOS, Red Hat Enterprise)	siehe Steuer-PC		

Auftreten (1-10)	Fehlereffekte			Bedeutung (1-10)	Detektionsmethode	Detektion (1-10)	Kompensationsmethode
	Lokal	Nächst höheres Level	Endeffekt				
2	Keine Verbindung zu einem äußeren Netzwerk möglich	-	-	5	Dauerhaft kein Zugriff auf das Netzwerk; E-Mail und SMS Fehler Service	2	Stromausfall: USV; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät; Passwort: Mindestlänge, Einsatz von Zahlen und Sonderzeichen, regelmäßige Änderung, sichere Bewahrung; Signalausfall: zwei Sim-Karten unterschiedlicher Provider
2	Angreifer hat Zugriff auf Netzwerk oder Benutzer hat keinen Zugriff auf Netzwerk	Netzwerkausfall durch Malware oder Abhören des Verkehrs	Kompletter Systemausfall und ungewollte Änderungen	8	Erkennen von unbekannten Zugriffen auf das Netzwerk durch Log-Dateien	2	Konfiguration: Neue Regeln hinzufügen, IP-Sperrlisten, Filterung, SYN-Cookies; Verschlüsselte Kommunikation Stromausfall: USV; Wasser/Staub/Tiere: Schaltschrank; Temperatur: Klimagerät; Passwort: Mindestlänge, Einsatz von Zahlen und Sonderzeichen, regelmäßige Änderung, sichere Bewahrung
2	Benutzer hat keinen Zugriff auf Netzwerk	-	Kein Zugriff auf das Netzwerk	8	Dauerhaft kein Zugriff auf das Netzwerk	2	Zweite parallele Firewall
2	Benutzer hat keinen Zugriff auf Netzwerk	-	Kein Zugriff auf das Netzwerk	8	Dauerhaft kein Zugriff auf das Netzwerk	2	Zweite parallele Firewall
2				8		2	-
2				8		2	-

MTBF	MTTR	Fehlergrad			
		Auftreten	Entdeckung	Bedeutung	RPN
-	-	2	2	5	20
-	-	2	2	8	32
-	-	2	2	8	32
-	-	2	2	8	32
-	-	2	2	8	32

A.5 FTA des IECplus-Messmastes für DFWind

Erklärung:	Dieses Dokument dient dazu, die Geräte und Sensoren, welche für den Betrieb des einzelnen IECplus-Messmastes notwendig sind, auf eine Fehlerverkettung zu analysieren. Eine Und-Verknüpfung bedeutet, dass beide Systeme ausfallen müssen, um das System ein Level weiter oben ausfallen zu lassen. Eine Oder-Verknüpfung bedeutet, dass nur ein einzelnes System ausfallen muss, um das System ein Level weiter oben ausfallen zu lassen.											
Abkürzungen:	SPD - Surge Protection Device (Überspannungsschutz)											
	USV - Unterbrechungsfreie Stromversorgung											
Ausfall eines Geräts oder einer Komponente	Verknüpfung		Ausfall eines Geräts oder einer Komponente / Erklärung	Verknüpfung		Ausfall eines Geräts oder einer Komponente / Erklärung	Verknüpfung		Ausfall eines Geräts oder einer Komponente			
Netzwerkverbindung des Steuer-PCs	oder	oder	Mobilfunkmodul	oder	und	Mobilfunkmast Provider 1						
						Mobilfunkmast Provider 2						
					oder	Hardware						
						Software						
					und	Einstellungs- / Bedienungsfehler						
						Stromversorgung						
				Firewall	oder	USV						
						Hardware						
					und	Software						
						Einstellungs- / Bedienungsfehler						
				Internet-Switch	oder	Stromversorgung						
						USV						
			und		Hardware							
					Software							
			Zentral-Switch	oder	Einstellungs- / Bedienungsfehler							
					Stromversorgung							
				und	USV							
					Hardware							
			imc Switch	oder	oder	Hardware						
						Software						
						Einstellungs- / Bedienungsfehler						
				Relais	oder	oder	oder	Hardware				
								PFC100-Controller	oder			
						und		Stromversorgung				
								USV				
				Hardware								
				Software								
				Relais	oder	oder	oder	Hardware				
								PFC100-Controller	oder			
			und		Stromversorgung							
					USV							
			Kabelverbindungen				SPD (RS422, RS485, RJ45 (USA))					
			Stromversorgung									
			USV									

Ausfall eines Geräts oder einer Komponente	Verknüpfung		Ausfall eines Geräts oder einer Komponente / Erklärung	Verknüpfung		Ausfall eines Geräts oder einer Komponente / Erklärung	Verknüpfung		Ausfall eines Geräts oder einer Komponente	Verknüpfung	Ausfall eines Geräts oder einer Komponente	
Datenaufnahme des Messsystems	oder	oder	Hardware									
			Software									
			einzelner Sensorwert	oder	Hardware							
					Software (USA, Barometer)							
					Montagefehler							
					Staub (Fehlmessung des							
					Vogel							
					unbefugte Person							
					Kabelverbindungen				SPD			
			Kabelverbindungen				SPD					
			Relais	oder	Hardware							
					PFC100-Controller		oder	Software				
					Einstellungs- / Bedienungsfehler							
		und	Stromversorgung									
	USV											